

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра антенн и устройств СВЧ

**Д. В. Гололобов, Ю. Ю. Бобков**

***ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ТЕОРИИ,  
АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ***

*Рекомендовано УМО по образованию в области информатики  
и радиоэлектроники в качестве учебно-методического пособия  
для специальностей 1-41 01 03 «Квантовые информационные системы»,  
1-39 01 01 «Радиотехника» (по направлениям), 1-39 02 01 «Моделирование  
и компьютерное проектирование радиоэлектронных средств»*

Минск БГУИР 2013

УДК [537.8+621.396.67](076)  
ББК 22.336я73+32.845я73  
Г61

**Р е ц е н з е н т ы:**  
кафедра радиотехники  
учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь»  
(протокол №3-2/2012 от 19.03.2012 г.);

заведующий кафедрой информатики и основ электроники  
учреждения образования «Белорусский государственный  
педагогический университет имени Максима Танка»,  
кандидат физико-математических наук, доцент  
К. А. Саечников

**Гололобов, Д. В.**  
Г61 Основы электромагнитной теории, антенны и устройства СВЧ :  
учеб.-метод. пособие / Д. В. Гололобов, Ю. Ю. Бобков. – Минск :  
БГУИР, 2013. – 79 с.  
ISBN 978-985-488-907-8.

Содержит программы, методические рекомендации и контрольные задания по дисциплинам «Электромагнитные поля и волны», «Электродинамика и распространение радиоволн», «Антенны и устройства СВЧ», «Основы электромагнитной теории». В каждом разделе представлены контрольные вопросы, способствующие самостоятельной подготовке студентов, предложена методика выполнения индивидуальных контрольных работ.

**УДК [537.8+621.396.67](076)**  
**ББК 22.336я73+32.845я73**

**ISBN 978-985-488-907-8**

© Гололобов Д. В., Бобков Ю. Ю., 2013  
© УО «Белорусский государственный  
университет информатики  
и радиоэлектроники», 2013

## ВВЕДЕНИЕ

Научно-технический прогресс в области информационных технологий неразрывно связан с разработкой и внедрением высокоскоростных систем передачи и обработки информации, обладающих высокой надежностью, малыми весогабаритными параметрами и приемлемой стоимостью. По разным оценкам специалистов в ближайшем будущем скорости информационных потоков в устройствах обработки и преобразования информации могут достигнуть величины порядка  $10^{12} \dots 10^{15}$  бит/с. Значительное увеличение скорости потоков в трактах обработки и преобразования информации, с одной стороны, обуславливает необходимость перемещения в область сверхвысоких (СВЧ) и крайне высоких частот (КВЧ), а с другой – ориентируются на использование в них методов и средств интегральной и квантовой электроники.

Использование частот СВЧ- и КВЧ-диапазонов для реализации необходимых функций предъявляет повышенные требования к радиоэлектронной аппаратуре и быстрейшему внедрению новых конструктивных технических решений. В процессе их внедрения требуется освоение новых подходов, связанных с использованием технологий, основанных на преобразованиях электромагнитных полей, трансформации структуры электродинамических сигналов как носителей информации.

Целью дисциплин является изучение основ теории электромагнитного поля, механизмов распространения радиоволн в слоях атмосферы, влияния подстилающих сред или ограниченного пространства на параметры и характеристики антенн, методов и средств экранирования электромагнитных излучений, элементов и устройств СВЧ-диапазона, расчета и измерения параметров этих устройств, их применения при проектировании радиоэлектронных устройств и систем.

При обеспечении безопасности объектов и информации требуется проводить ряд организационных и технических мероприятий, определяющих меры по созданию условий для нормального функционирования в среде потенциальных вредных воздействий и возможностей извлечения информации.

# **1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И ВОЛНЫ**

## **1.1. Содержание программы**

### **1.1.1. Основные уравнения электродинамики**

Определение электромагнитного поля (ЭМП). Векторы ЭМП. Четыре уравнения Максвелла в дифференциальной и интегральной формах. Их физическое содержание. Закон сохранения заряда и уравнение непрерывности. Материальные уравнения, классификация сред.

### **1.1.2. Граничные условия для векторов ЭМП**

Граничные условия (ГУ) для тангенциальных составляющих. ГУ для нормальных составляющих векторов ЭМП. ГУ на поверхности идеального проводника.

### **1.1.3. Энергия ЭМП**

Удельная мощность сторонних источников в ЭМП. Баланс энергии в ЭМП. Теорема Умова – Пойнтинга.

### **1.1.4. Монохроматические электромагнитные поля**

Уравнения Максвелла в комплексной форме, комплексная диэлектрическая и магнитная проницаемость. Закон сохранения энергии для монохроматического поля, комплексный вектор Умова – Пойнтинга.

Постановка задач для монохроматического поля, теорема единственности. Уравнения Гельмгольца для векторов поля. Электродинамические потенциалы.

### **1.1.5. Излучение электромагнитных волн**

Решение неоднородного уравнения Гельмгольца. Условие излучения на бесконечности. Элементарный электрический вибратор. Поля элементарного вибратора в ближней и дальней зонах. Сферические волны. Диаграмма направленности. Мощность и сопротивление излучения вибратора. Магнитный ток. Перестановочная инвариантность уравнений Максвелла, принцип двойственности. Поле элементарного магнитного вибратора. Проводимость излучения магнитного вибратора. Лемма Лоренца. Принцип взаимности. Теорема эквивалентности и формула Кирхгофа.

### **1.1.6. Плоская электромагнитная волна**

Плоская волна в непроводящей среде. Фазовая скорость волны, волновое сопротивление среды. Поляризация волн. Плоская волна в среде с потерями. Коэффициент фазы и коэффициент затухания. Глубина проникновения. Дисперсия, групповая скорость.

Плоские волны в гиротропных средах (плазма, ферриты в постоянном магнитном поле). Продольное и поперечное распространение волн. Эффект вращения плоскости поляризации.

Падение волны на плоскую границу раздела сред. Законы Снеллиуса и формула Френеля. Полное отражение. Поверхностные волны. Угол полного преломления. Понятие о двойном преломлении при падении электромагнитных волн на границу с гиротропной средой.

Особенности преломления волны в проводящих средах. Граничные условия Леонтовича. Потери энергии в проводнике, поверхностный эффект.

### **1.1.7. Дифракция и рефракция электромагнитных волн**

Задача дифракции как граничная задача электродинамики. Дифракция плоской волны на круглом цилиндре. Приближенные методы решения задач дифракции в квазистатической и квазиоптической областях.

Физическая оптика. Дифракция на отверстии в экране в приближении Кирхгофа. Дифракционное поле в дальней зоне. Зоны Френеля. Геометрическая оптика. Рефракция электромагнитных волн в неоднородной среде. Понятие о геометрической теории дифракции.

### **1.1.8. Направляющие системы и направляемые волны**

Классификация и общие свойства направляемых волн. Быстрые и медленные волны.

Волны типа  $E$  ( $TM$ ) и  $H$  ( $TE$ ). Граничная задача для волноводов.

Прямоугольный волновод. Решение граничной задачи. Структура и свойства полей в волноводе.

Типы волн, дисперсия, фазовая и групповая скорости распространения волн в волноводе. Основная волна  $H_{10}$ . Токи и заряды на стенках волноводов.

Круглый волновод. Решение граничной задачи. Простейшие типы волны  $H_{11}$ ,  $E_{10}$ ,  $H_{01}$ .

Коаксиальная линия. Основная волна  $T$  ( $TEM$ ). Понятие о высших типах волн в коаксиальной линии. Полосковые линии.

### **1.1.9. Резонаторы**

Электромагнитные поля в объемных резонаторах. Граничная задача для резонатора. Решение граничной задачи для прямоугольного, цилиндрического и коаксиального резонаторов. Типы колебаний в объемном резонаторе, собственные частоты. Добротность резонаторов. Понятие о возбуждении резонаторов. Понятие о квазиоптических резонаторах.

### **1.1.10. Элементы и узлы линий передачи**

Элементы коаксиальных линий передачи: соединения, элементы крепления внутреннего проводника, изгибы, короткозамыкающие поршни. Элементы волноводных линий: соединения, изгибы, реактивные элементы, разветвления, переходники. Узлы СВЧ-трактов: поглощающие нагрузки, аттенюаторы, взаимные фазовращатели, фильтры типов волн, волноводные вращающиеся сочленения.

### **1.1.11. Согласование линий передачи с нагрузкой**

Цели согласования линии передачи с нагрузкой. Узкополосное согласование. Методы согласования одним реактивным шлейфом, двухшлейфным трансформатором, четвертьволновым трансформатором. Примеры расчета согласующих устройств.

Широкополосное согласование. Ограничения в теории широкополосного согласования. Пример расчета широкополосного согласующего устройства. Принципы широкополосного согласования активных нагрузок. Плавные и ступенчатые переходы.

### **1.1.12. Частотные фильтры СВЧ**

Характеристика и типы фильтров. Синтез фильтра по рабочим параметрам. Расчет числа и величин элементов фильтра-прототипа. Фильтр с четвертьволновыми связями. Связь задачи синтеза фильтров с задачей широкополосного согласования.

Техническая реализация и применение фильтров на СВЧ.

### **1.1.13. Делители мощности и балансные устройства СВЧ**

Волноводные тройники. Двойной волноводный тройник. Основные свойства.

Направленные ответвители. Основные параметры, конструкции волнового и коаксиального ответвителей.

Балансные мосты. Волноводно-щелевой мост. Конструкция. Кольцевые балансные мосты.

### **1.1.14. Устройства СВЧ с намагниченными ферритами**

Распространение электромагнитных волн в продольно- и поперечно-намагниченных средах. Эффект Фарадея. Продольный и поперечный феррорезонансы. Эффект смещения поля. Явление двойного лучепреломления.

Ферритовые фазовращатели. Фазовращатели на круглом и прямоугольном волноводах.

Вентили. Вентиль на прямоугольном волноводе. Резонансные вентили на прямоугольном волноводе. Вентили на смещении поля.

Циркуляторы. Циркулятор на круглом волноводе. Фазовые циркуляторы. У-циркулятор. Применение циркуляторов.

## Литература

### Основная

1. Кураев, А. А. Электродинамика и распространение радиоволн / А. А. Кураев, Т. Л. Попкова, А. К. Сеницын. – Минск : Бестпринт, 2004.
2. Гололобов, Д. В. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства : метод. пособие. Ч. 1. Распространение радиоволн. / Д. В. Гололобов, В. Б. Кирильчук. – Минск : БГУИР, 2004.
3. Гололобов, Д. В. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства : метод. пособие. Ч. 2. Фидерные устройства / Д. В. Гололобов, В. Б. Кирильчук. – Минск : БГУИР, 2005.
4. Вольман, В. И. Техническая электродинамика / В. И. Вольман, Ю. В. Пименов. – М. : Связь, 1971, 2002.
5. Семенов, Н. А. Техническая электродинамика / Н. А. Семенов. – М. : Связь, 1973.
6. Никольский, В. В. Электродинамика и распространение радиоволн / В. В. Никольский, Т. И. Никольская. – М. : Наука, 1998.
7. Баскаков, И. С. Электродинамика и распространение радиоволн / И. С. Баскаков. – М. : Высш. шк., 1993.

### Дополнительная

8. Красюк, П. Л. Электродинамика и распространение радиоволн / П. Л. Красюк, П. Д. Дымович. – М. : Высш. шк., 1974.
9. Ширман, Я. Д. Радиоволноводы и объемные резонаторы / Я. Д. Ширман. – М. : Связьиздат, 1959.
10. Основы проектирования микроэлектронной аппаратуры / под ред. Б. Ф. Высоцкого. – М. : Сов. радио, 1977.
11. Вайнштейн, Л. А. Электромагнитные волны / Л. А. Вайнштейн. – М. : Радио и связь, 1988.

## 1.2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

### 1.2.1. Основные уравнения электродинамики

Необходимо знать: определения векторов электромагнитного поля  $\vec{E}$ ,  $\vec{D}$ ,  $\vec{B}$ ,  $\vec{H}$  и связь между ними; классификацию сред по макроскопическим параметрам (линейные и нелинейные, однородные и неоднородные, изотропные и анизотропные); физический смысл уравнений Максвелла и их запись в интегральной и дифференциальной формах.

Изучая уравнения Максвелла при наличии сторонних токов и зарядов, необходимо разобраться в сути понятия сторонних сил и формах их задания (сторонние заряды, ток, напряженность поля).

Уметь классифицировать электромагнитные явления по характеру их изменения во времени (переменные, статические, стационарные и квазистационарные поля).

#### *Контрольные вопросы*

1. Определение векторов электромагнитного поля  $\vec{E}$ ,  $\vec{D}$ ,  $\vec{B}$ ,  $\vec{H}$ .
2. Первое и второе уравнения Максвелла и их физический смысл.
3. Ток проводимости и ток смещения.
4. Третье и четвертое уравнения Максвелла и их физический смысл.
5. Уравнение непрерывности и закон сохранения заряда.
6. Классификация электромагнитных явлений по характеру их изменения во времени.
7. Понятие о сторонней напряженности поля, сторонних токах и зарядах; запись уравнений Максвелла с учетом этих величин.

### 1.2.2. Граничные условия для векторов ЭМП

Необходимо понимать границу раздела сред. Обратит внимание на то, что в общем случае граница является криволинейной, а электромагнитная волна падает на границу под произвольным углом. Поэтому следует проводить анализ нормальных и тангенциальных составляющих ЭМП.

#### *Контрольные вопросы*

1. Определение границы раздела сред.
2. Условия для тангенциальных составляющих поля на границе раздела двух сред.
3. Условия для нормальных составляющих поля на границе раздела двух сред.
4. Поверхностный ток и поверхностная плотность заряда.

### 1.2.3. Энергия ЭМП

Необходимо знать удельную мощность сторонних источников. Разобраться во всех составляющих баланса энергии в ЭМП. Знать определение вектора Умова – Пойнтинга, теорему Умова – Пойнтинга.

#### *Контрольные вопросы*

1. Определение вектора Умова – Пойнтинга  $\vec{P}$ .
2. Определение удельной мощности.
3. Баланс энергий ЭМП.
4. Определение теоремы Умова – Пойнтинга.

### 1.2.4. Монохроматические электромагнитные поля

Важным для практики является изучение переменного электромагнитного поля, изменяющегося по синусоидальному периодическому (гармоническому) закону. Зная законы, описывающие поведение гармонического (или, как часто называют, монохроматического) поля, можно с помощью спектрального анализа найти электромагнитное поле, изменяющееся во времени по более сложному закону.

Необходимо усвоить запись уравнений Максвелла для монохроматического поля в комплексной форме, выяснить смысл введения комплексной диэлектрической и магнитной проницаемостей, тангенса угла потерь; знать критерий деления сред на проводники и диэлектрики.

#### *Контрольные вопросы*

1. Комплексная диэлектрическая и магнитная проницаемости среды, тангенс угла потерь. Критерий деления сред на проводники и диэлектрики.
2. Система уравнений Максвелла для монохроматического поля в комплексной форме.

### 1.2.5. Излучение электромагнитных волн

Необходимо четко представлять, что первичным источником электромагнитных волн являются электрические заряды,двигающиеся с ускорением, или, другими словами, ток, меняющийся во времени. Для полного понимания работы излучающих систем важно усвоить принцип работы элементарных излучателей. Как правило, расчет полей излучающих систем ведется методом суперпозиции: вся система разбивается на элементарные излучатели, находится поле от каждого, а затем поля всех излучателей суммируются. Следует обратить внимание на принцип эквивалентности и принцип Гюйгенса – Кирхгофа, которые позволяют проследить за распространением фронта волны, начиная с момента, в который фронт волны является известным.

## **Контрольные вопросы**

1. Суть процесса излучения электромагнитных волн.
2. Элементарный электрический излучатель, его определение и принцип работы.
3. Анализ структуры поля элементарного электрического излучателя.
4. Диаграммы направленности элементарного электрического излучателя (в полярной и прямоугольной системах координат).
5. Мощность излучателя, сопротивление излучения элементарного электрического излучателя.
6. Ближняя и дальняя зоны.
7. Элементарный магнитный излучатель; поле в дальней зоне.
8. Перестановочная двойственность уравнений Максвелла.

### **1.2.6. Плоская электромагнитная волна**

При изучении плоских волн необходимо помнить, что векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  электромагнитной волны перпендикулярны друг другу и изменяются во времени и пространстве по гармоническим законам. В идеальной диэлектрике волны не затухают. В реальной среде распространение волны всегда связано с затуханием. Обратите внимание на то, что параметры волны в среде без потерь не зависят от частоты, а в среде с проводимостью зависят. Зависимость свойств волны от частоты называется дисперсией. Следует знать определение фазовой скорости, коэффициента фазы и затухания, скорости переноса энергии, волнового сопротивления.

Среды, свойства которых различны по разным направлениям, называют анизотропными; в таких средах векторы  $\vec{P}$  и  $\vec{E}$ ,  $\vec{D}$  и  $\vec{E}$ , а также  $\vec{M}$  и  $\vec{H}$ ,  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  могут быть непараллельными и один из этих параметров является тензором.

В ферромагнитных средах тензором является магнитная проницаемость. В постоянном магнитном поле один из видов магнетиков – феррит – становится анизотропной средой по отношению к переменному полю. В данном разделе следует обратить внимание на физическую природу анизотропии. Знать уравнения Максвелла для анизотропных сред.

## **Контрольные вопросы**

1. Определение однородной плоской волны. Выражение для векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  этой волны.
2. Напишите выражение для фазовой скорости, длины волны, волнового числа, комплексного вектора Пойнтинга и волнового сопротивления в среде с потерями и без потерь.
3. Коэффициент фазы и коэффициент затухания; фазовая скорость и длина волны в среде с малыми и большими потерями.
4. Физическая природа анизотропии. Примеры анизотропных сред.

5. Анизотропные магнетики. Тензор магнитной проницаемости и смысл его составляющих.
6. Зависимость составляющих тензора магнитной проницаемости феррита от напряженности поля подмагничивания. Ферромагнитный резонанс.
7. Фазовые скорости и поляризация волн в продольно-намагниченном феррите.
8. Эффект Фарадея. Вращение плоскости поляризации. Необратимость эффекта Фарадея.
9. Фазовые скорости и поляризация волн в поперечно-намагниченном феррите.

### **1.2.7. Дифракция и рефракция электромагнитных волн**

Рассматривается явление дифракции электромагнитных волн и методы решения задач дифракции (приближение Гюйгенса – Кирхгофа, геометрической оптики, метод краевых волн).

#### ***Контрольные вопросы***

1. Явление дифракции электромагнитных волн. Приближенные решения дифракционных задач.
2. Условия применимости геометрической оптики. Изменение интенсивности поля вдоль луча в приближении геометрической оптики.
3. Условия применимости физической оптики. Приближения физической оптики.
4. Понятие рефракции.

### **1.2.8. Направляющие системы и направляемые волны**

Необходимо рассмотреть системы для передачи энергии электромагнитного поля, такие как прямоугольный и круглый волновод, коаксиальную линию, полосковые и микрополосковые линии. Следует усвоить методы решения волновых уравнений для продольной составляющей основных волн и уметь определить поперечные составляющие, а также изобразить структуры полей в прямоугольном и круглом волноводах.

Иметь четкое представление о параметрах направляющих систем и параметрах направляемых волн (фазовая и групповая скорости, длина волны, коэффициент фазы, критическая частота, характеристическое сопротивление).

#### ***Контрольные вопросы***

1. Типы направляющих систем и требования, предъявляемые к ним.
2. Классификация направляемых волн.
3. Волновые уравнения для направляемых волн.
4. Решение волнового уравнения для продольной составляющей в прямоугольном волноводе.
5. Структура поля и параметры волн  $E$  и  $H$  в прямоугольном волноводе.
6. Решение волнового уравнения для волны  $E$  и  $H$  в круглом волноводе.

7. Структура полей и основные параметры волн типа  $E$  и  $H$  в круглом волноводе.
8. Токи на стенках волноводов при распространении различных типов волн.
9. Структура полей и условия их существования в коаксиальной линии.
10. Параметры полосковых и микрополосковых линий. Технология изготовления микрополосковых линий. Применение микрополосковых линий.

### 1.2.9. Резонаторы

Следует усвоить принципы построения объемных резонаторов из отрезков регулярных линий передач и методику расчета их основных характеристик, изображения структуры полей основных типов. Знать способы возбуждения объемных резонаторов.

#### *Контрольные вопросы*

1. Типы объемных резонаторов. Основные параметры: резонансная частота, добротность.
2. Четвертьволновой и полуволновой коаксиальный резонаторы.
3. Основное поле прямоугольного резонатора. Собственная частота. Эскиз распределения поля. Добротность.
4. Цилиндрический резонатор. Собственные частоты. Эскизы распределения полей типа  $E_{010}$ ,  $E_{011}$ ,  $H_{011}$ ,  $H_{111}$ .
5. Потери энергии в объемном резонаторе. Собственная, внешняя и нагруженная добротности.
6. Способы возбуждения объемных резонаторов.
7. Квазистационарные резонаторы. Метод расчета резонансных частот. Области применения.

### 1.2.10. Элементы и узлы линий передачи

В современном фидерном тракте в общем случае содержится ряд неоднородностей в виде устройств возбуждения и отбора энергии из волновода или другого типа линии передачи, модуляции, детектирования, фильтрации электромагнитного сигнала и т. д. Особенности работы этих устройств и методы определения их параметров являются содержанием данного раздела. Особое внимание следует обратить на физические принципы работы устройств, позволяющие проводить расчет из основных параметров по эквивалентным схемам с сосредоточенными параметрами.

#### *Контрольные вопросы*

1. Конструкции и свойства коаксиальных линий. Их сравнительные характеристики и области применения.
2. Элементы, применяемые для настройки коаксиальных линий.

3. Устройство и принцип работы коаксиального вращающегося сочленения.
4. Способы сочленения волноводов и коаксиальных линий.
5. Способы сочленения прямоугольных и круглых волноводов.
6. Устройство четвертьволновой вставки, реактивных штырей и диафрагм, используемых для настройки волноводов.
7. Устройство  $T$ -образных волноводных ответвителей, дроссельных фланцевых соединений и короткозамыкающих поршней прямоугольного волновода.
8. Атенюаторы поглощающие и предельные; согласованные нагрузки.
9. Устройство детекторных и термисторных головок.
10. Линия передачи конечной длины. Основы узкополосного согласования.
11. Способы микроминиатюризации элементов фидерного тракта.

### **1.2.11. Согласование линий передачи**

Основная задача согласования – построение и расчет согласующего четырехполюсника. Элементы узкополосного согласующего четырехполюсника могут быть рассчитаны точно или приближенно по круговой диаграмме.

Для практических целей точность, получающаяся при использовании круговой диаграммы, достаточна. Поэтому усвоение методов расчета согласующего устройства с применением круговой диаграммы здесь является основой. При изучении широкополосного согласования необходимо обратить внимание на отличие постановки задачи широкополосного согласования от соответствующей задачи узкополосного согласования.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Причины согласования линии передачи с нагрузкой.
2. Принцип узкополосного согласования посредством одного реактивного шлейфа.
3. Изменение методики согласования одним реактивным шлейфом в случае, если волновое сопротивление шлейфа не равно волновому сопротивлению линии.
4. Принцип согласования двухшлейфовым трансформатором.
5. Основное свойство четвертьволнового отрезка линии передачи.
6. Задача широкополосного согласования линии передачи с комплексной нагрузкой.
7. Ограничения в теории широкополосного согласования линии передачи с нагрузкой.
8. Отличия требований к согласующему четырехполюснику в случаях узкополосного и широкополосного согласований.

### **1.2.12. Частотные фильтры СВЧ**

Необходимо четко усвоить классификацию фильтров СВЧ по типу частотной характеристики, иметь понятие о расчете резонансной частоты, коэффициента передачи и нагруженной добротности. Знать, каким образом реали-

зуются многозвенные фильтры СВЧ с четвертьволновыми и непосредственными связями, а также режекторные фильтры.

### ***Контрольные вопросы***

1. Методика расчета и построение ступенчатых переходов с максимально плоской и чебышевской частотными характеристиками.
2. Полосовой и режекторный фильтры и их эквивалентные схемы. Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики.
3. Фильтры гармоник: резонансные, апериодические, с поглощением энергии гармоник.

#### **1.2.13. Делители мощности и балансные устройства СВЧ**

В этом разделе изучаются трех- и четырехплечные узлы без потерь (волноводные, коаксиальные; микрополосковые), которые служат для ответвления энергии СВЧ, регулировки мощности проходящей волны, сложения и разделения сигналов, измерений и коммутаций в трактах СВЧ. Основой для анализа этих устройств является матрица рассеяния, конкретная форма которой определяется геометрией узла и особенностями электромагнитных процессов, которые в нем протекают. Следует обратить внимание на использование матрицы рассеяния узлов при решении разнообразных задач, а также на функциональные особенности этого или иного СВЧ-узла, обуславливающие возможности его использования на практике.

### ***Контрольные вопросы***

1. Свойства  $E$ - и  $H$ -тройников с согласованными плечами. Распределение мощности между плечами во всех вариантах включения генератора.
2. Направленные ответвители: основные свойства, параметры и области применения.
3. Основные свойства двойного  $T$ -образного моста, способы согласования плеч, применение.
4. Квадратный и кольцевой мосты: основные свойства, распределение мощности между плечами во всех вариантах включения генератора.
5. Щелевой мост: основные свойства, способы согласования, применение.
6. Делители мощности и балансные устройства СВЧ в микрополосковом исполнении.

#### **1.2.14. Устройства СВЧ с намагничеными ферритами**

В разделе рассматриваются волноводные устройства с ферритами, обладающими не взаимными свойствами.

В волноводных трактах радиорелейных линий, приемников СВЧ используются вентили, пропускающие волну практически только в одном направлении и тем самым улучшающие согласование волновода с оконечными устрой-

ствами. Следует освоить принципы, положенные в основу работы резонансных вентилях и вентилях на смещении поля, а также невзаимных и взаимных фазовращателей. В последние годы наибольшее распространение из невзаимных устройств получают циркуляторы – трех- или четырехплечные невзаимные узлы, пропускающие волну между соседними плечами лишь в определенном направлении. На использовании циркуляторов основано построение большого числа функциональных схем: вентилях, согласованных полосовых и режекторных фильтров, переключателей фильтров разделительных и ряда других устройств.

### *Контрольные вопросы*

1. Вентили с поперечным ферромагнитным резонансом: принцип работы, устройство, параметры.
2. Вентили, базирующиеся на эффекте смещения поля: принцип работы, устройство, параметры.
3. Невзаимные и взаимные фазовращатели: принцип работы, устройство, параметры.
4. Циркуляторы. Примеры использования в функциональных устройствах СВЧ.
5. Циркулятор, основанный на эффекте Фарадея.
6. Фазовые циркуляторы: принцип работы, устройство, параметры.
7. Y-циркуляторы: принцип работы, устройство, параметры.

### 1.3. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

#### Инструкция по выполнению контрольной работы

Вариант задания определяется двумя последними цифрами номера студенческого билета:  $m$  – предпоследняя,  $n$  – последняя.

При выполнении контрольных работ необходимо придерживаться следующих требований:

1. Укажите прежде, чем выполнять какой-либо расчет, его цель, дайте ссылку на источник, откуда берете расчетные соотношения (номер литературы по списку), и номер формулы.
2. Поясните все вновь вводимые значения.
3. Напишите общую формулу, подставьте в нее числовые значения известных величин, приведите результаты промежуточных вычислений и конечный результат. В промежуточных вычислениях размерности величин не указываются; в конечном результате приведение размерности обязательно.
4. Выразите все величины в стандартных единицах Международной системы единиц СИ.
5. Выполните все расчеты с точностью до третьей значащей цифры.
6. Определите векторные величины, сопровождая их рисунком с указанием направления векторов.
7. Стройте графики на миллиметровой бумаге. Они должны содержать стандартный масштаб, размерности величин и расчетные точки. Рисунки должны быть разборчивыми.
8. Указывайте при выполнении контрольной работы номер студенческого билета и номер варианта.
9. Приведите в конце работы список использованной литературы и распишитесь.

## КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

**Задача 1.** Плоская однородная электромагнитная волна распространяется в безграничной полупроводящей среде вдоль оси  $z$ . Известны амплитуда напряженности электрического поля  $E_m$ , частота источника поля  $f$ , удельная проводимость среды  $\sigma$ , ее относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  и абсолютная магнитная проницаемость  $\mu_a = \mu_0$  (табл. 1, 2).

Пользуясь данными соответствующего варианта, необходимо:

1. Определить коэффициент фазы  $\beta$  и коэффициент затухания  $\alpha$  распространяющейся волны.
2. Найти модуль  $|Z|$  и фазу  $\varphi$  комплексного волнового сопротивления  $Z$ .
3. Записать выражения для комплексных амплитуд и мгновенных значений напряженности электрического и магнитного полей.
4. Определить расстояние  $z_0$ , на котором амплитуда волны убывает в 1000 раз.
5. Вычислить значения фазовой скорости волны.
6. Найти длину волны в данной среде.

Таблица 1

$m$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\varepsilon$	80	75	70	65	60	50	40	30	20	20
$f$ , МГц	100	200	100	200	100	200	100	200	100	200

Таблица 2

$n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$E_m$ , В/м	50	60	70	80	90	100	105	110	115	120
$\sigma$ , См/м	2,0	4,0	5,0	6,0	10	15	10	6,0	8,0	4,0

При решении этой задачи следует помнить о том, что классификация сред по проводимости производится исходя из соотношения между плотностями токов проводимости и смещения.

Если плотности токов соизмеримы, то среда полупроводящая. В этом случае  $\beta$ ,  $\alpha$  и  $W$  зависят от электрических параметров среды и частоты электрических колебаний. От этих же величин зависят длина волны в исследуемой среде и фазовая скорость.

**Задача 2.** В прямоугольном волноводе, выполненном из идеально проводящего материала, с поперечными размерами  $a \times b$  (табл. 3, 4) требуется:

1. Определить критическую и выбрать рабочую длину волны в волноводе.
2. Выписать компоненты поля волны заданного типа.
3. Изобразить графически эпюры распределения векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  вдоль соответствующих сторон волновода. Нарисовать эскиз, иллюстрирующий распределение токов проводимости и токов смещения.

4. Рассчитать передаваемую мощность, если амплитуда электрической составляющей поля в пучности равна 1 В/м, а также предельно допустимую мощность ( $E_{\text{проб}} = 3 \cdot 10^6$  В/м).

5. Рассчитать значение фазовой и групповой скорости волны в волноводе.

6. Определить типы волн, которые могут при выбранной длине волны распространиться в данном волноводе, а также при длине волны в четыре раза меньше, чем выбранная.

Таблица 3

$m$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$a$ , м	0,02	0,02	0,04	0,04	0,06	0,06	0,08	0,08	0,05	0,02
$b$ , м	0,01	0,02	0,01	0,02	0,03	0,02	0,04	0,02	0,05	0,02

Таблица 4

$n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип волны	$H_{22}$	$E_{21}$	$H_{10}$	$E_{12}$	$H_{21}$	$E_{21}$	$H_{11}$	$E_{22}$	$H_{12}$	$H_{01}$

Решение задачи целесообразно начинать с расчета критической волны для заданных размеров поперечного сечения и заданного типа волны. Воспользовавшись алгоритмом построения структуры поля для волны произвольного типа изобразить распределение силовых линий в поперечном и продольном сечениях волновода, а также распределение токов проводимости и смещения.

**Задача 3.** Необходимо определить размеры резонатора на заданном типе колебаний (табл. 5) и заданной рабочей частоте (табл. 6). Зарисовать конструкцию резонатора и метод его возбуждения.

Таблица 5

$m$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Конструкция резонатора	Прямоугольный					Цилиндрический				
Тип колебаний	$H_{101}$	$H_{112}$	$H_{102}$	$E_{111}$	$E_{121}$	$H_{111}$	$H_{121}$	$H_{011}$	$H_{112}$	$E_{012}$

Таблица 6

$n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Частота $f$ , ГГц	6	7	8	9	10	3	4	5	6	7
Метод возбуж- дения	Штырь			Петля			Штырь			

После изображения заданного типа колебания в объеме резонатора изобразить местоположение возбуждающего устройства и привести сечение резонатора, совпадающее с расположением устройства возбуждения.

Библиотека БГУИР

## **2. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН**

### **2.1. Содержание программы**

#### **Введение**

Место и назначение дисциплины «Электродинамика и распространение радиоволн» в подготовке радиоинженеров. Основное содержание дисциплины. Электромагнитное поле как вид материи. Круг задач, решаемых методами классической электродинамики.

#### **2.1.1. Электродинамика**

##### **2.1.1.1. Основные уравнения электродинамики**

Вектор напряженности электрического поля и вектор электрического смещения. Материальные уравнения, диэлектрическая проницаемость, магнитная проницаемость, удельная проводимость. Плотность тока проводимости. Ток смещения и полный ток. Вектор напряженности магнитного поля и вектор магнитной индукции. Графическое изображение полей.

Уравнения Максвелла в дифференциальной и интегральной форме. Закон сохранения заряда, уравнения непрерывности. Сторонние источники.

Классификация сред (линейные и нелинейные, изотропные, анизотропные, однородные и неоднородные). Идеальные диэлектрики и идеальные проводники. Относительность разделения сред на диэлектрики и проводники. Постановка задач электродинамики, граничные и начальные условия. Закон сохранения энергии для электромагнитного поля. Вектор Пойнтинга.

##### **2.1.1.2. Граничные условия для векторов электромагнитного поля**

Граничные условия для тангенциальных и нормальных составляющих векторов электромагнитного поля (ЭМП) на границе раздела двух сред в макроскопическом приближении. Излом границы. Граничные условия на поверхности идеального проводника.

##### **2.1.1.3. Энергия электромагнитного поля**

Мощность в электромагнитном поле. Сторонние токи. Баланс энергии в ЭМП. Теорема Умова – Пойнтинга. Удельная энергия ЭМП. Вектор Пойнтинга, его физическая адекватность плотности потока энергии ЭМП. Комплексные амплитуды напряженностей ЭМП для монохроматических сигналов. Теорема о комплексной мощности. Понятие о реактивной мощности. Полные диэлектрические и магнитные потери.

##### **2.1.1.4. Волновые уравнения и электродинамические потенциалы**

Формулировка внутренней и внешней задач электродинамики. Теоремы единственности для внутренней и внешней задач электродинамики. Волновые

уравнения для векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ . Электродинамические потенциалы  $\vec{A}$  и  $\Phi$ , волновые уравнения для них. Частное решение для свободного пространства (запаздывающие потенциалы). Градиентная инвариантность потенциалов. Электрический потенциал Герца  $\vec{I}^e$ , его источники. Фиктивные магнитные токи и заряды. Перестановочная двойственность уравнений Максвелла и использование этого свойства при решении задач электродинамики. Магнитный вектор Герца  $\vec{I}^m$ ,  $\vec{I}_z^e$  и E-волны,  $\vec{I}_z^m$  и H-волны. Граничные условия для  $\vec{I}_z^e$ ,  $\vec{I}_z^m$  на идеально проводящих координатных поверхностях.

#### **2.1.1.5. Направляющие системы и направляемые волны. Волноводы**

Типы волноводов. Постановка и методы решения волноводных задач. Собственные значения и собственные функции, их свойства. Характеристики E- и H-волн в регулярных волноводах. Волновое сопротивление, фазовая и групповая скорости волн. Связь продольных и поперечных составляющих напряженностей E- и H-волн с собственной функцией, ее градиентом и линиями уровня собственной функции. Структура полей E- и H-типов в прямоугольном и круглом волноводах. Физическая картина распространения волн в волноводе. Т-волны в многосвязных структурах. Регулярные замедляющие системы. Нормальная и аномальная дисперсия. Пространственные гармоники. Потери и затухание волн в волноводах. Анализ частотной зависимости постоянной затухания.

#### **2.1.1.6. Возбуждение волноводов сторонними источниками**

Лемма Лоренца. Теорема взаимности и ее следствия. Ортогональность собственных волн в регулярных волноводах. Уравнения возбуждения регулярных волноводов сторонними токами. Схемы возбуждения волноводов: штырь, петля, щель, окно, электронный поток.

#### **2.1.1.7. Теория нерегулярных волноводов**

Неортогональные системы координат. Ковариантные и контравариантные проекции векторов. Отображение произвольной нерегулярной внутренней поверхности волновода на регулярный цилиндр единичного радиуса. Контравариантные проекции уравнений Максвелла в преобразованной системе. Уравнения возбуждения связанных волн нерегулярных волноводов сторонними электрическими и магнитными токами. Переход к физическим векторам  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ . Периодически нерегулярные волноводы – замедляющие системы. Невыполнение условий Флоке в периодических нерегулярных волноводах.

#### **2.1.1.8. Резонаторы**

Типы резонаторов. Расчет полей резонаторов с помощью потенциалов Герца. Собственные колебания и собственные частоты идеальных резонаторов. Собственная, внешняя и нагруженная добротности резонатора. Расчет собст-

венной добротности резонатора. Уравнения возбуждения резонатора с конечной проводимостью стенок. Частотный и пространственный резонанс. Селективное возбуждение рабочего типа колебаний. Возбуждение резонаторов щтырем, петель, щелью, окном, электронным потоком.

### **2.1.1.9. Вариационные и проекционные методы решения внутренних задач электродинамики**

Элементы вариационного исчисления, определения и основная теорема. Уравнения экстремали. Идея и схема прямых вариационных методов решения задач электродинамики. Методы Ритца и Трефтца. Алгоритмы решения задач. Проекционные методы. Метод Бубнова – Галеркина. Пример – решение задачи о колебаниях резонатора с некоординатной граничной поверхностью.

## **2.1.2. Распространение радиоволн**

### **2.1.2.1. Возбуждение ЭМВ в свободном пространстве**

Расчет возбуждения и структура ЭМП элементарными электрическим и магнитным диполями. Поля в ближней и дальней зонах. Формирование поля излучения. Сферические волны. Плоские волны как приближение поля на конечном участке сферической волны. Сопротивление излучения. Мощность излучения. Эквивалентные источники ЭМП. Поляризация волн. Затухание плоской ЭМВ.

### **2.1.2.2. Дифракция**

Понятие о дифракции ЭМВ. Принцип Гюйгенса. Формула Кирхгофа. Зоны Френеля. Форма и размеры области, существенной для распространения радиоволн. Дифракция ЭМВ от непрозрачных препятствий.

### **2.1.2.3. Отражение и прохождение плоских ЭМВ на границе раздела двух сред**

Нормальное падение плоской ЭМВ на границу раздела двух сред. Коэффициент прохождения и коэффициент отражения. Условия согласования. Наклонное падение плоской волны на границу раздела двух сред. Горизонтальная и вертикальная поляризации. Формулы Френеля для коэффициентов отражения и прохождения. Законы Снелиуса. Анализ угловых зависимостей модуля и фазы коэффициента отражения в случае идеальных диэлектриков. Критические углы и угол Брюстера. Среды с потерями. Приближенные граничные условия Леонтовича – Щукина.

### **2.1.2.4. Влияние земной поверхности на распространение радиоволн**

Поглощение и отражение радиоволн земной поверхностью. Поле излучателя, поднятого над плоской поверхностью Земли. Интерференционная формула. Рассеяние радиоволн на шероховатой поверхности Земли. Статистические характеристики рассеянного поля. Дифракция на крупных неровностях.

Поле излучателя, расположенного непосредственно у плоской поверхности Земли. Однородная и неоднородная трассы. Скорость распространения радиоволн над Землей. Дифракция радиоволн на сферической поверхности Земли. Диапазоны частот, допустимые для использования в морской воде и почве. Классификация случаев распространения земных радиоволн.

#### **2.1.2.5. Распространение радиоволн в тропосфере**

Строение тропосферы. Рефракция радиоволн в тропосфере. Уравнение радиолуча. Эквивалентный радиус Земли. Нормальная рефракция. Сверхрефракция. Потери и затухание волн в тропосфере. Рассеяние и резонансные потери. Частотные зависимости коэффициента затухания ЭМВ в тропосфере.

#### **2.1.2.6. Распространение радиоволн в ионосфере**

Строение ионосферы. Основные слои. Суточные, сезонные и географические изменения структуры. Диэлектрическая проницаемость ионизированного газа без учета столкновений. Частота Ленгмюра. Рефракция радиоволн в ионосфере. Критическая частота отражающихся от ионосферы волн. Влияние столкновений электронов с тяжелыми частицами. Поглощение радиоволн в ионизированном газе. Влияние магнитного поля земли на распространение ЭМВ в ионосфере. Эффект Фарадея. Двойное лучепреломление. Фазовые искажения радиоимпульса.

#### **2.1.2.7. Информационные подходы к анализу влияния электромагнитных полей на биологические объекты**

Модель Фрелиха для анализа воздействия ЭМВ. Понятие об акустических колебаниях на поверхности мембран. Биотропные параметры источников колебаний. Применение источников ЭМВ.

#### **2.1.2.8. Гиротропные среды. Ферриты**

Понятие о гиротропных средах. Тензор магнитной проницаемости. Структуры ферритов. Гиромагнитный резонанс. Тензор магнитной проницаемости ферритов. Эффект Фарадея. Невзаимные и управляемые устройства СВЧ на ферритах, в которых используется гиромагнитный резонанс и эффект Фарадея.

## Литература

### Основная

1. Кураев, А. А. Электродинамика и распространение радиоволн / А. А. Кураев, Т. Л. Попкова, А. К. Синицын. – Минск : Бестпринт, 2004.
2. Никольский, В. В. Электродинамика и распространение радиоволн / В. В. Никольский. – М. : Наука, 1973.
3. Никольский, В. В. Электродинамика и распространение радиоволн / В. В. Никольский, Т. И. Никольская. – М. : Наука, 1989.
4. Вольман, В. И. Техническая электродинамика / В. И. Вольман, Ю. В. Пименов. – М. : Связь, 1971.
5. Вольман, В. И. Техническая электродинамика / В. И. Вольман, Ю. В. Пименов, А. Д. Муравцов. – М. : Радио и связь, 2002.
6. Марков, Г. Т. Электродинамика и распространение радиоволн / Г. Т. Марков, Б. М. Петров, Г. П. Грудинская. – М. : Наука, 1979.
7. Долуханов, М. П. Распространение радиоволн / М. П. Долуханов. – М. : Связь, 1972.
8. Черный, Ф. Б. Распространение радиоволн / Ф. Б. Черный. – М. : Сов. радио, 1972.
9. Вайнштейн, Л. А. Электромагнитные волны / Л. А. Вайнштейн. – М. : Радио и связь, 1988.
10. Гольдштейн, Л. Д. Электромагнитные поля и волны / Л. Д. Гольдштейн, М. В. Зернов. – М. : Сов. радио, 1971.

### Дополнительная

11. Никольский, В. В. Вариационные методы для внутренних задач электродинамики / В. В. Никольский. – М. : Наука, 1967.
12. Кураев, А. А. Мощные приборы СВЧ. Методы анализа и оптимизации параметров / А. А. Кураев. – М. : Радио и связь, 1986.
13. Демидчик, В. И. Электродинамика СВЧ / В. И. Демидчик. – Минск : Университетское, 1992.
14. Машковцев, Б. М. Теория волноводов / Б. М. Машковцев, К. Н. Цибилов, Б. Ф. Емелин. – М. : Наука, 1966.
15. Левин, Л. Теория волноводов / Л. Левин. – М. : Радио и связь, 1981.
16. Тараненко, З. И. Замедляющие системы / З. И. Тараненко, Я. К. Трохименко. – Киев : Техника, 1965.
17. Кураев, А. А. Математические модели и методы оптимального проектирования СВЧ приборов / А. А. Кураев, В. Б. Байбурин, Е. М. Ильин. – Минск : Наука и техника, 1997.

## 2.2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

### Введение

В этом разделе следует обратить внимание на усвоение положения о реальности существования электромагнитного поля как одной из форм материи. Изучение дисциплины проводится в рамках классической (макроскопической) электродинамики; вопросы квантовой теории поля не затрагиваются.

### *Контрольные вопросы*

1. Краткий исторический очерк развития учения об электромагнетизме.
2. Электромагнитное поле как одна из форм существования материи. Условность разделения поля на электрическое и магнитное.

### 2.2.1. Электродинамика

#### 2.2.1.1. Основные уравнения электродинамики

Необходимо знать: определения векторов электромагнитного поля  $\vec{E}$ ,  $\vec{D}$ ,  $\vec{B}$ ,  $\vec{H}$  и связь между ними; классификацию сред по макроскопическим параметрам (линейные и нелинейные, однородные и неоднородные, изотропные и анизотропные); физический смысл уравнений Максвелла и их запись в интегральной и дифференциальной формах.

Изучая уравнения Максвелла при наличии сторонних токов и зарядов, необходимо разобраться в сути понятия «сторонних сил» и формах их задания (сторонние заряды, ток, напряженность поля). Надо уметь классифицировать электромагнитные явления по характеру их изменения во времени (переменные, статические, стационарные и квазистационарные поля).

### *Контрольные вопросы*

1. Определение векторов электромагнитного поля  $\vec{E}$ ,  $\vec{D}$ ,  $\vec{B}$ ,  $\vec{H}$ .
2. Первое и второе уравнения Максвелла и их физический смысл.
3. Ток проводимости и ток смещения.
4. Третье и четвертое уравнения Максвелла и их физический смысл.
5. Уравнение непрерывности и закон сохранения заряда.
6. Классификация электромагнитных явлений по характеру их изменения во времени.
7. Понятие о сторонней напряженности поля, сторонних токах и зарядах; запись уравнений Максвелла с учетом этих величин.

#### 2.2.1.2. Граничные условия для векторов электромагнитного поля

Необходимо понимать определение границы раздела сред. Обратить внимание на то, что в общем случае граница является криволинейной, а электро-

магнитная волна падает на границу под произвольным углом. Поэтому следует проводить анализ нормальных и тангенциальных составляющих ЭМП.

### ***Контрольные вопросы***

1. Определение границы раздела сред.
2. Условия для тангенциальных составляющих поля на границе раздела двух сред.
3. Условия для нормальных составляющих поля на границе раздела двух сред.

#### **2.2.1.3. Энергия электромагнитного поля**

Необходимо разобраться во всех составляющих баланса энергии в ЭМП. Знать, что такое вектор Умова – Пойнтинга, а также теорему Умова – Пойнтинга.

### ***Контрольные вопросы***

1. Определение вектора Умова – Пойнтинга.
2. Баланс энергий ЭМП.
3. Формулировка теоремы Умова – Пойнтинга.

#### **2.2.1.4. Волновые уравнения и электродинамические потенциалы**

Прямое решение задачи о ЭМП – использование уравнений Максвелла. Однако они содержат и вектор  $\vec{E}$ , и вектор  $\vec{H}$ . Используя преобразования уравнений Максвелла, можно получить волновые уравнения для  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ . Волновые уравнения определяют характер распространения ЭМВ. Поэтому следует разобраться в аналитическом представлении этого процесса с учетом и без учета потерь.

При решении ряда электродинамических задач удобным оказывается использование принципа перестановочной двойственности, суть которого заключается во взаимной замене векторов электрического и магнитного поля. Для применения этого принципа приходится вводить фиктивные (реально не существующие) магнитные заряды и токи. Однако это оказывается очень полезным при решении практических задач электродинамики.

Электродинамические потенциалы являются элементами описания волновых процессов. Следует уяснить понятие скалярного и векторного потенциалов, а также их взаимосвязь, определяемую калибровкой Лоренца. И в этой связи необходимостью введения электрического и магнитного потенциалов Герца.

### ***Контрольные вопросы***

1. Волновые уравнения для векторов электрического поля без учета потерь.
2. Волновые уравнения для векторов и магнитного поля без потерь.
3. Волновые уравнения для векторов электрического поля с учетом потерь.
4. Волновые уравнения для векторов и магнитного поля с учетом потерь.
5. Приведите уравнения Гельмгольца.
6. Определение электрического и магнитного потенциалов.
7. Определение вектора Герца.
8. Формулировка принципа перестановочной двойственности.

#### **2.2.1.5. Направляющие системы и направляемые волны. Волноводы**

Необходимо рассмотреть системы для передачи энергии электромагнитного поля, такие, как прямоугольный и круглый волновод, коаксиальная линия, полосковые и микрополосковые линии. Обратите внимание на волноводы с произвольным поперечным сечением, влиянием их размеров на их основные параметры. Следует усвоить методы решения волновых уравнений для продольной составляющей основных волн и уметь определить поперечные составляющие, а также изобразить структуры полей в прямоугольном и круглом волноводах.

Иметь четкое представление о параметрах направляющих систем и параметрах направляемых волн (фазовая и групповая скорости, длина волны, коэффициент фазы, критическая частота, характеристическое сопротивление).

### ***Контрольные вопросы***

1. Типы направляющих систем и требования, предъявляемые к ним.
2. Классификация направляемых волн.
3. Волновые уравнения для направляемых волн.
4. Решение волнового уравнения для продольной составляющей в прямоугольном волноводе.
5. Структура поля и параметры волн  $E$  и  $H$  в прямоугольном волноводе.
6. Решение волнового уравнения для волны  $E$  и  $H$  в круглом волноводе.
7. Структура полей и основные параметры волн типа  $E$  и  $H$  в круглом волноводе.
8. Токи на стенках волноводов при распространении различных типов волн.
9. Структура полей и условия их существования в коаксиальной линии.
10. Параметры полосковых и микрополосковых линий. Технология изготовления микрополосковых линий. Применение микрополосковых линий.

### **2.2.1.6. Возбуждение волноводов сторонними источниками**

Следует уяснить полезность леммы Лоренца и теоремы взаимности при решении практических задач электродинамики и антенн. Необходимо при этом обосновать введение взаимных векторов Пойнтинга и их физические следствия. При изучении схем возбуждения требуется помнить правила: при возбуждении штырем (электронным потоком) – они должны располагаться параллельно электрическим силовым линиям в местах его максимальной концентрации; при возбуждении петель – ее площадь должна быть ортогональна магнитным силовым линиям поля; при возбуждении щелью (окном) – они должны прерывать линии поверхностного тока проводимости.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Определение леммы Лоренца.
2. Практический смысл теоремы взаимности.
3. Пример возбуждения ЭМП штырем.
4. Пример возбуждения ЭМП петель.
5. Пример возбуждения ЭМП щелью.
6. Пример возбуждения ЭМП электронным потоком.

### **2.2.1.7. Теория нерегулярных волноводов**

Необходимо знать отличия регулярных и нерегулярных волноводов, отличия решения задач, связанных с их различием. В связи с этим необходимость использования неортогональных систем координат при решении задач с применением нерегулярных волноводов. Уяснить преобразования при этом уравнений Максвелла и его решений при возбуждении и учете их периодических структур.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Отличие регулярных и нерегулярных волноведущих структур.
2. Необходимость применения неортогональных систем координат при решении задач нерегулярных электродинамических структур.
3. Уравнения Максвелла для нерегулярных волноводов.
4. Решения уравнений возбуждения для нерегулярных волноводов.
5. Замедляющие системы: применение, назначение, виды.

### **2.2.1.8. Резонаторы**

При изучении данного подраздела следует усвоить принципы построения объемных резонаторов из отрезков регулярных линий передач и методику расчета их основных характеристик, изображения структуры полей основных типов, знать способы возбуждения объемных резонаторов.

### ***Контрольные вопросы***

1. Типы объемных резонаторов. Основные параметры: резонансная частота, добротность.
2. Четвертьволновой и полуволновой коаксиальный резонаторы.
3. Основное поле прямоугольного резонатора. Собственная частота. Эскиз распределения поля. Добротность.
4. Цилиндрический резонатор. Собственные частоты. Эскизы распределения полей типа  $E_{010}$ ,  $E_{011}$ ,  $H_{011}$ ,  $H_{111}$ .
5. Потери энергии в объемном резонаторе. Собственная, внешняя и нагруженная добротности.
6. Способы возбуждения объемных резонаторов.
7. Квазистационарные резонаторы. Метод расчета резонансных частот. Области применения.

#### **2.2.1.9. Вариационные и проекционные методы решения внутренних задач электродинамики**

Необходимо знать элементы вариационного исчисления, определения и основные методы численных решений электродинамических задач.

### ***Контрольные вопросы***

1. Уравнения экстремали.
2. Прямые вариационные методы решения задач электродинамики.
3. Методы Ритца и Третьяка.
4. Проекционные методы.

#### **2.2.2. Распространение радиоволн**

##### **2.2.2.1. Возбуждение ЭМВ в свободном пространстве**

Необходимо знать конечные выражения для элементов ЭМП элементарных излучателей, которые зависят от расстояния до точки наблюдения. Разобраться с поведением поля в ближней, промежуточной и дальней зоне, поведения в этих зонах активной и реактивной составляющей поля. Повторить материал первого раздела, связанного с плоскими ЭМВ. Рассмотреть вопрос о видах поляризации волны (линейной, круговой, эллиптической), способах формирования поляризации ЭМВ, факторах, влияющих на затухание волн в пространстве с заданными электродинамическими параметрами.

### ***Контрольные вопросы***

1. Формулы, определяющие поле диполя Герца и элемента Гюйгенса.
2. Ближняя, промежуточная и дальняя зоны действия излучения.

3. Виды поляризации.
4. Затухание волн в средах с конечными параметрами.

#### **2.2.2.2. Дифракция**

Рассматриваются явление дифракции электромагнитных волн и методы решения задач дифракции (приближение Гюйгенса – Кирхгофа, геометрической оптики, метод краевых волн). Особое внимание следует уделить понятию зон Френеля, а также зоны существенной для распространения радиоволн. Дифракционные задачи решаются в настоящее время повсеместно. В связи с этим следует рассмотреть частные задачи, связанные с процессами преобразования ЭМП на отверстия, прямоугольном препятствии и др.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Явление дифракции электромагнитных волн. Приближенные решения дифракционных задач.
2. Условия применимости геометрической оптики. Изменение интенсивности поля вдоль луча в приближении геометрической оптики.
3. Условия применимости физической оптики. Приближения физической оптики.
4. Определение зон Френеля.

#### **2.2.2.3. Отражение и прохождение плоских ЭМВ на границе раздела двух сред**

Необходимо иметь четкое представление о коэффициентах отражения и преломления (коэффициентах Френеля) в зависимости от поляризации, угла падения и частоты. Законы Снелиуса (Снеля) используются для описания первых моделей РРВ в тропо- и ионосфере и имеют фундаментальное значение при выборе механизма распространения и оптимизации параметров ЭМВ. Следует проанализировать коэффициенты отражения и прохождения при различных углах падения волны для уяснения эффектов полного прохождения и внутреннего отражения. Рассмотреть практические задачи по оценке импеданса среды с использованием приближенных граничных условий Леонтовича – Щукина.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Коэффициенты Френеля.
2. Зависимость коэффициентов Френеля от поляризации.
3. Зависимость коэффициентов Френеля от угла падения.
4. Зависимость коэффициентов Френеля от частоты.
5. Суть законов Снелиуса (Снелля).
6. Определение угла Брюстера.
7. Условия Леонтовича – Щукина.

#### **2.2.2.4. Влияние земной поверхности на распространение радиоволн**

Необходимо знать: свойства плоской волны, распространяющейся в неограниченной полупроводящей среде, выражения коэффициентов распространения и поглощения при различных соотношениях между токами проводимости и смещения, четко представлять картину отражения радиоволн от поверхности Земли.

Следует уяснить связь между напряженностью поля в свободном пространстве и полем в реальных условиях.

Необходимо отчетливо представлять смысл термина «поднятая антенна» и условия применимости лучевой трактовки при определении множителя ослабления. Надо уяснить вывод формул множителя ослабления и знать эти формулы в окончательном виде, а также условия применимости каждой из них.

Обязательно знание формул идеальной радиопередачи Шулейкина – Вандер-Поля, выражения численного расстояния и множителя ослабления.

Необходимо ясно представлять картину распространения волны над трассой из двух однородных участков и вид графика множителя ослабления трассы из трех однородных участков.

Следует ознакомиться с историей изучения вопросов дифракции, знать одночленную дифракционную формулу и область ее применимости, уметь пользоваться графиками для расчета поля земных волн.

Необходимо четко представлять особенности расчета дифракционного поля в различных диапазонах волн, уметь вычислять множитель ослабления и напряженность поля в областях полутени и тени.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Определение длины радиоволны с частотой 20 кГц, распространяющейся в толще сухой почвы. Во сколько раз уменьшится напряженность поля этой волны на протяжении 100 м?
2. Учет влияния неоднородностей и неровностей почвы. Эквивалентные параметры почвы.
3. Понятие поднятой антенны. В каких диапазонах волн применяются такие антенны?
4. Влияние близости поверхности Земли на поле в пункте приема. Зависимость множителя ослабления от расстояния.
5. Определение дальности прямой видимости, если высоты антенн равны 100 м и 20 м.
6. Вычисление величины произведения приведенных высот на трассе длиной 30 км, если действительные высоты антенн равны 100 м и 20 м.
7. Определение границы зон освещенности, полутени и тени при высотах антенн 100 м и 20 м. Область применимости интерференционных формул и одночленной дифракционной формулы в этих условиях.

### **2.2.2.5. Распространение радиоволн в тропосфере**

Необходимо знать: состав и строение тропосферы, ее параметры, свойства «нормальной тропосферы», зависимость индекса преломления от метеорологических параметров, уметь изобразить профиль индекса преломления. Необходимо провести вывод выражения радиуса кривизны траектории и окончательную формулу, классификацию видов рефракции.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Высота тропосферы и определяющие ее факторы. Распределение давления, температуры и влажности по высоте тропосферы. «Нормальная тропосфера» и ее свойства.
2. Связь индекса преломления с коэффициентом преломления и диэлектрической проницаемостью. Зависимость индекса преломления от метеорологических параметров тропосферы.
3. Значения индекса преломления и его градиента у поверхности Земли в нормальной тропосфере. Профиль индекса преломления нормальной тропосферы.
4. Тропосферная рефракция, ее причины и проявления в диапазоне УКВ и оптическом диапазоне.
5. Виды тропосферной рефракции. Форма траектории волны, значения градиента индекса преломления для каждого вида рефракции.

### **2.2.2.6. Распространение радиоволн в ионосфере**

Необходимо изучить способы исследования верхних слоев атмосферы, ее состав, механизм и источники ионизации, распределение ионизации по высоте однородной атмосферы, знать сущность процесса рекомбинации и строение реальной ионосферы.

Обязательно знание процессов распространения радиоволн в однородном ионизированном газе, его эквивалентных параметров при наличии постоянного магнитного поля.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Методы изучения состава ионосферы. Распределение температуры и давления по высоте. Барометрическая формула.
2. Ионизация атмосферы. Энергия частиц, необходимая для ударной ионизации.
3. Основные источники ионизации.
4. Распределение ионной концентрации по высоте реальной атмосферы.
5. Свойства ионизированных слоев.
6. Распространение радиоволн в ионизированном газе при наличии магнитного поля.

### **2.2.2.7. Информационные подходы к анализу влияния электромагнитных полей на биологические объекты**

Рассмотрение данного вопроса следует связать с вопросами экологии. Следует проанализировать влияние электромагнитного поля на организм человека (провести оценки с использованием сведений по определению напряженности, мощности, плотности потока мощности), модель Фрелиха, возникновение акустических волн на мембране.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Способ определения предельно допустимой дозы (нормы), если известно, что предельно допустимая плотность потока мощности составляет  $10 \text{ мкВт/см}^2$ .
2. Пояснение модели Фрелиха.
3. Способ возникновения акустических колебаний на мембране.

### **2.2.2.8. Гиrotропные среды. Ферриты**

В разделе рассматривается узкий класс анизотропных сред – гиrotропные, описываемые неполным тензором диэлектрической и магнитной проницаемости. К таким средам относится ионизированный газ и ферриты. В частности, в подмагниченных ферритах может возникать четыре эффекта взаимодействия с ЭМВ: поперечный и продольный резонансы, эффекты Фарадея и смещения поля. Все они проявляются при различных значениях поля подмагничивания. Устройства на основе ферритов обладают невзаимными свойствами.

В волноводных трактах радиорелейных линий, приемников СВЧ используются вентили, пропускающие волну практически только в одном направлении и тем самым улучшающие согласование волновода с оконечными устройствами, циркуляторы – трех- или четырехплечные невзаимные узлы, пропускающие волну между соседними плечами лишь в определенном направлении. На использовании циркуляторов основано построение большого числа функциональных схем: вентиляей, согласованных полосовых и режекторных фильтров, переключателей фильтров разделительных и ряда других устройств.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Тензор магнитной проницаемости гиrotропной среды и выражения для его компонентов. От чего они зависят?
2. Эффекты возникающие в ферритах.
3. Суть эффекта Фарадея.
4. Проявление свойств невзаимности.
5. Устройства, где используются ферриты. Принцип их действия.

## 2.3. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

### Инструкция по выполнению контрольных работ

Контрольные задания составлены в 100 вариантах. Каждый студент выполняет две контрольные работы. Вариант задания определяется двумя последними цифрами номера студенческого билета:

$m$  – предпоследняя,  $n$  – последняя.

При выполнении контрольных работ необходимо придерживаться следующих требований:

1. Укажите прежде, чем выполнять какой-либо расчет, его цель, дайте ссылку на источник, откуда берете расчетные соотношения (номер литературы по списку), и номер формулы.
2. Поясните все вновь вводимые значения.
3. Напишите общую формулу, подставьте в нее числовые значения известных величин, приведите результаты промежуточных вычислений и конечный результат. В промежуточных вычислениях размерности величин не указываются; в конечном результате приведение размерности обязательно.
4. Выразите все величины в стандартных единицах Международной системы единиц СИ.
5. Выполните все расчеты с точностью до третьей значащей цифры.
6. Определите векторные величины, сопровождая их рисунком с указанием направления векторов.
7. Стройте графики на миллиметровой бумаге. Они должны содержать стандартный масштаб, размерности величин и расчетные точки. Рисунки должны быть разборчивыми.
8. Указывайте при выполнении контрольной работы номер студенческого билета и номер варианта.
9. Приведите в конце работы список использованной литературы и распишитесь.

### **КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА 1**

**Задача 1.** Плоская однородная электромагнитная волна распространяется в безграничной полупроводящей среде вдоль оси  $z$ . Известны амплитуда напряженности электрического поля  $E_m$ , частота источника поля  $f$ , а также электродинамические параметры среды: удельная проводимость  $\sigma$ , относительная диэлектрическая  $\epsilon$  и магнитная  $\mu$  проницаемость (табл. 1, 2).

Пользуясь данными соответствующего варианта, необходимо:

1. Определить коэффициент фазы  $\beta$  и коэффициент затухания  $\alpha$  распространяющейся волны.

2. Найти модуль  $|Z_C|$  и фазу  $\varphi$  комплексного волнового сопротивления среды  $Z_C$ . Определить контраст (отличие) сопротивлений среды  $Z_C$  и воздуха  $Z_0$ , а также его модуль и фазу.
3. Записать выражения для комплексных амплитуд и мгновенных значений напряженности электрического и магнитного полей.
4. Определить расстояние  $z_0$ , на котором амплитуда волны убывает в 1000 раз.
5. Вычислить значения фазовой скорости волны.
6. Найти длину волны в данной среде.

Таблица 1

$m$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\epsilon$	80	75	70	65	60	50	40	30	20	20
$\mu$	1	2	3	4	5	4	3	3	1	2
$f$ , МГц	90	200	100	200	100	200	100	200	100	200

Таблица 2

$n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$E_m$ , В/м	50	60	70	80	90	100	105	110	115	120
$\sigma$ , См/м	2,0	4,0	5,0	6,0	10	15	10	6,0	8,0	4,0

При решении этой задачи следует помнить о том, что классификация сред по проводимости производится исходя из соотношения между плотностями токов проводимости и смещения.

Если плотности токов соизмеримы, то среда полупроводящая. В этом случае  $\beta$ ,  $\alpha$  и  $Z$  зависят от электрических параметров среды и частоты электрических колебаний. От этих величин зависят длина волны в исследуемой среде и фазовая скорость.

**Задача 2.** В волноводе, выполненном из меди, с поперечными размерами  $a \times b$  или радиусом  $R$  требуется (табл. 3, 4):

1. Определить критическую и выбрать рабочую длину волны в волноводе.
2. Выписать компоненты поля волны заданного типа.
3. Изобразить графически эпюры распределения векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  вдоль соответствующих сторон волновода. Нарисовать эскиз, иллюстрирующий распределение токов проводимости и токов смещения.
4. Рассчитать передаваемую мощность, если амплитуда электрической составляющей поля в пучности равна 1 В/м, а также предельно допустимую мощность ( $E_{\text{ПРИБ}} = 3 \cdot 10^6$  В/м).
5. Рассчитать значение фазовой и групповой скорости волны в волноводе.
6. Определить типы волн, которые могут при выбранной длине волны распространяться в данном волноводе, а также при длине волны в четыре раза меньше, чем выбранная.

Таблица 3

$m$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$a$ , мм	40	457		72	13		131	2		5,7
$b$ , мм	20	229		34	5,8		65	1		2,9
$R$ , мм			77			25			50	

Таблица 4

$n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип волны	$H_{10}$	$E_{11}$	$H_{20}$	$E_{12}$	$H_{21}$	$E_{21}$	$H_{11}$	$E_{22}$	$H_{12}$	$H_{22}$

Решение задачи целесообразно начинать с графического изображения структуры поля волны заданного типа. После этого необходимо выписать составляющие векторы напряженности электрического и магнитного поля изображаемой волны, учитывая закон, по которому они изменяются.

**Задача 3.** Линия без потерь с волновым сопротивлением  $Z$  имеет нагрузку  $Z_n = R_n + jX_n$  (табл. 5). Используя диаграмму Смита, необходимо определить:

1. Нормированное сопротивление нагрузки  $Z_n^*$ .
2. Нормированную проводимость нагрузки  $Y_n^*$ .
3. Проводимость нагрузки  $Y_n$ .
4. КСВ нагрузки, значения модуля и фазы коэффициента отражения.
5. Согласовать линию передач с помощью шлейфа, тип которого указан в табл. 6, на длине волны  $\lambda$ .
6. Определить КПД линии с нагрузкой до и после согласования.

Таблица 5

$n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$Z$ , Ом	50	75	50	75	50	75	50	75	50	75
$R_n$ , Ом	40	70	50	60	40	30	40	70	80	100
$X_n$ , Ом	70	40	80	70	-70	-20	10	-70	-70	20

Таблица 6

$n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\lambda$ , см	10	12	15	20	3	7	25	20	30	25
Тип* шлейфа	<i>кз</i>	<i>раз</i>								
Включение шлейфа**	<i>пар</i>	<i>пар</i>	<i>пос</i>	<i>пос</i>	<i>пар</i>	<i>пар</i>	<i>пос</i>	<i>пос</i>	<i>пар</i>	<i>пос</i>

\* – *кз* – короткозамкнутый, *раз* – разомкнутый;

\*\* – *пар* – параллельный; *пос* – последовательный

При выполнении задачи необходимо воспользоваться круговой диаграммой Смита (Вольперта – Смита), которая приведена в прил. 1 данного методического пособия. Для изучения методики пользования диаграммой рекомендуется обратиться к методической работе:

Измерение параметров нагрузок и методика их согласования с линиями передачи. Метод. указания к лабораторной работе №2 / Д. В. Гололобов [и др.] . – Минск : БГУИР, 2006.

## КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА 2

**Задача 1.** Даны излучаемая мощность (или действующее значение силы тока  $I_D$  в пучности вертикальной антенны), частота передатчика  $f$  и вид почвы, над которой распространяется волна (табл. 7, 8).

Пользуясь данными соответствующего варианта, необходимо:

1. Рассчитать зависимость действующего значения  $E_D$  напряженности поля от расстояния  $r$  без учета сферичности земной поверхности. Вычисления выполняются для  $r/r_{\max} = 0,1; 0,4; 0,7; 1,0$ .
2. Найти величину напряженности поля  $E_D$  на расстоянии  $1,5 r_{\max}$  и  $2 r_{\max}$  с учетом сферичности земной поверхности.
3. Построить график полученной зависимости. По оси абсцисс откладывается равномерная шкала расстояний (в километрах). На оси ординат наносятся логарифмическая шкала напряженности поля  $E_D$  (мкВ/м) и сопряженная с ней равномерная шкала  $E_{дБ}$  (децибел по отношению к 1 мкВ/м).

Прежде, чем строить график, надо составить таблицу пересчета в децибелы всех вычисленных значений напряженности поля.

4. Рассчитать напряженность поля ионосферной волны на расстояниях  $1,5r_{\max}$  и  $2 r_{\max}$ . Нанести полученные точки на тот же график и провести через них кривую линию. Указать, когда существует ионосферная волна.
5. Вычислить составляющие поля в почве на расстоянии  $4 r_{\max}$  от передатчика на глубине  $h$ .
6. Определить угол наклона фронта волны. Описать характер ее поляризации.

Таблица 7

$m$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P$ , кВт		10		15		20		25		30
$I_D$ , А	30		25		20		15		10	
$h$ , м	15	20	25	15	20	25	15	20	25	20

Таблица 8

$n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$f$ , кГц	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200
Почва	влаж.	сух.								
$r_{\max}$ , км	300	280	260	240	220	200	180	160	120	100

При расчете поля по излучаемой мощности следует принять коэффициент направленности передающей антенны  $G = 1,5$ . Для вариантов, где задан ток в антенне, надо считать, что ее действующая высота  $h_d = 0,15$ . При решении п. 2 необходимо воспользоваться следующими рекомендациями.

Напряженность поля волны, распространяющейся над сухой почвой, определяется с помощью графика, приведенного на рис. 1. На оси ординат нанесена равномерная шкала напряженности поля  $E_{д1}$  (в децибелах по отношению к 1 мкВ/м) при излучаемой мощности 1 кВт. Для других значений мощности напряженность поля пропорциональна квадратному корню из значения мощности. График для других частот приведен в прил. 2.

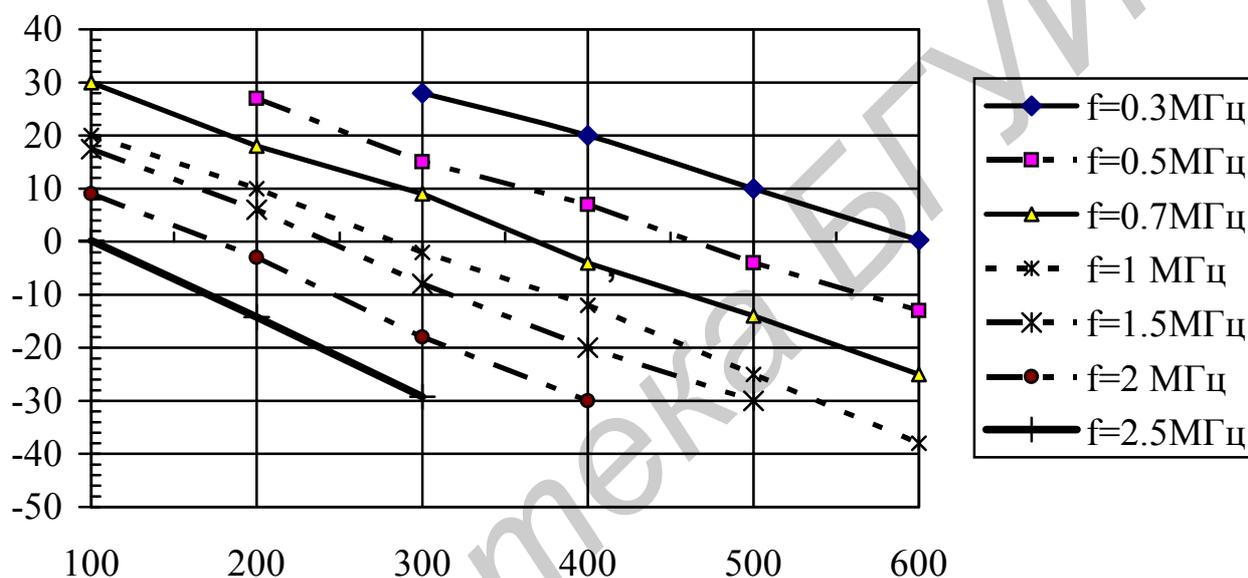


Рис. 1. К расчету напряженности поля с учетом сферичности Земли

**П р и м е р.** Рассчитать напряженность поля, создаваемого передатчиком мощностью 5 кВт на расстоянии 350 км. Частота передатчика равна 0,5 МГц. Волна распространяется над сухой почвой.

При излучаемой мощности 1 кВт по графику получается  $E_{д1} = 10,2$  дБ или  $10^{10,2/20} = 3,24$  мкВ/м.

При мощности в 5 Вт

$$E_d = E_{д1} \sqrt{P} = 3,24 \sqrt{5} = 7,25 \text{ мкВ/м.}$$

Для влажной почвы расчет производится с помощью аналогичного графика, приведенного в прил. 3. В источнике [7] приведена формула для вычисления излучаемой мощности по току в антенне.

**Задача 2.** Две антенны с высотой подвеса  $h$  над поверхностью с удельной проводимостью  $\sigma$ , относительной диэлектрической  $\epsilon$  и магнитной  $\mu$  проницаемостью, коэффициентами усиления  $G$  и поляризацией  $p$ , расположенные в свободном пространстве на расстоянии  $r_0$ , работают в диапазоне  $\Delta f$  с центральной частотой  $f$  (табл. 9, 10). Минимально допустимый уровень сигнала на входе приемника должен превышать уровень шума на  $\Delta P$ . Рассчитать минимально требуемую мощность передатчика в ваттах, обеспечивающую устойчивую работу канала связи.

Таблица 9

$m$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$r_0$ , км	100	50	150	42000	780	40	1500	50	150	42000
$\Delta f$ , МГц	100	200	300	30	100	15	150	100	200	20
$f$ , ГГц	8	4	10	15	4	2,4	9	2,4	27	8
$h$ , м	15	20	25	15	20	25	15	20	25	20

Таблица 10

$n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Delta P$ , дБ	30	40	20	25	35	40	30	20	15	15
$G$ , дБ	30	20	30	60	20	15	20	15	20	40
$p$	в	г	в	г	в	г	в	г	в	г
$\epsilon$	80	75	70	65	60	50	40	30	20	20
$\mu$	1	2	3	4	5	4	3	3	1	2
$\sigma$ , См/м	2,0	4,0	5,0	6,0	10	15	10	6,0	8,0	4,0

в – вертикальная; г – горизонтальная поляризация.

В задаче следует пренебречь влиянием тропосферы и учитывать влияние поверхности Земли.

### **3. АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ**

#### **3.1. СОДЕРЖАНИЕ КУРСА**

##### **Введение**

Место и назначение курса «Антенны и устройства СВЧ» (АиУСВЧ) в подготовке радиоинженеров. Круг задач, которые рассматриваются в теории и практике антенной техники.

##### **3.1.1. Основы теории цепей СВЧ**

Характеристики линий передачи конечной длины: коэффициент отражения, КБВ, КСВ, входное сопротивление, входная проводимость. Режимы работы линии конечной длины. Диаграмма полных сопротивлений (проводимостей).

Двухполюсники СВЧ. Параметры двухполюсника. Соединения двухполюсников. Двухполюсник резонансного типа.

Четырехполюсники. Волновые и классические матрицы четырехполюсника. Соединения четырехполюсников в диапазоне СВЧ. Условия взаимности, симметрии и реактивности четырехполюсника в параметрах матриц. Входное сопротивление и рабочее затухание четырехполюсника.

##### **3.1.2. Элементы и узлы линий передачи**

Элементы коаксиальных линий передачи: соединения, элементы крепления внутреннего проводника, изгибы, короткозамыкающие поршни.

Элементы волноводных линий: соединения, изгибы, реактивные элементы, делители, сумматоры, переходники.

Узлы СВЧ-трактов: поглощающие нагрузки, аттенюаторы, взаимные фазовращатели, фильтры типов волн, волноводные вращающиеся сочленения.

##### **3.1.3. Согласование линии передачи с нагрузкой**

Цепи согласования линии передачи с нагрузкой. Узкополосное согласование. Методы согласования одним реактивным шлейфом, двухшлейфовым трансформатором, четвертьволновым трансформатором. Примеры расчета согласующих устройств.

Широкополосное согласование. Ограничения в теории широкополосного согласования. Пример расчета широкополосного согласующего устройства. Принципы широкополосного согласования активных нагрузок. Плавные и ступенчатые переходы.

##### **3.1.4. Частотные фильтры СВЧ**

Характеристика и типы фильтров. Синтез фильтра по рабочим параметрам. Расчет числа и величин элементов фильтра-прототипа. Фильтр с четвертьволновыми связями. Связь задачи синтеза фильтров с задачей широкополосного согласования.

Техническая реализация и применение фильтров на СВЧ.

### **3.1.5. Делители мощности и балансные устройства СВЧ**

Волноводные тройники. Двойной волноводный тройник. Основные свойства.

Направленные ответвители. Основные параметры, конструкции волноводного и коаксиального ответвителей.

Балансные мосты. Волноводно-щелевой мост. Конструкция. Кольцевые балансные мосты.

### **3.1.6. Устройства СВЧ с намагниченными ферритами**

Распространение электромагнитных волн в продольно и поперечно-намагниченных средах. Эффект Фарадея. Продольный и поперечный феррорезонансы. Эффект смещения поля. Явление двойного лучепреломления.

Ферритовые фазовращатели. Фазовращатели на круглом и прямоугольном волноводах.

Вентили. Вентиль на круглом волноводе. Резонансные вентили на прямоугольном волноводе. Вентили на смещении поля.

Циркуляторы. Циркулятор на круглом волноводе. Фазовые циркуляторы. Y-циркулятор.

### **3.1.7. Электродинамические основы теории антенн**

Понятие приемной и передающей антенн. Элементарные излучатели: электрический и магнитный диполи Герца, щелевой излучатель, элемент Гюйгенса.

Основные теоремы электродинамики в теории антенн: теорема взаимности, принцип двойственности, теорема эквивалентности. Баланс энергии и эквивалентная схема антенны.

Энергетические характеристики передающей антенны (мощность и сопротивление излучения, мощность и сопротивление потерь, коэффициент полезного действия). Входное сопротивление и входная проводимость передающей антенны.

Характеристика направленности, фазовая, поляризация и частотная характеристики, коэффициент усиления передающей антенны.

### **3.1.8. Направленность систем излучателей и задача синтеза антенны**

Антенна как система излучателей. Поля излучения и направленность произвольных дискретной и непрерывной систем излучателей.

Классификация систем излучателей по построению и способу возбуждения.

Линейные периодические системы идентичных излучателей (равноамплитудные синфазные, равноамплитудные с изменением фаз по линейному закону). Система рефлектор – директор.

Линейные непрерывные системы (распределения) излучателей (провод с бегущей волной тока, провод со стоячей волной тока).

Плоские периодические и непрерывные системы идентичных излучателей. Идеальная плоская (поверхностная) антенна.

Влияние амплитудного и фазового распределения в раскрыве на характеристику направленности.

Влияние идеально проводящей плоскости и поверхности Земли на свойства антенн.

Принципы построения частотно-независимых антенн.

Задача построения антенны (распределения источников) с заданными свойствами. Основные методы решения этой задачи. Проблема построения антенн с заданной направленностью. Способы решения этой задачи. Примеры построения линейных и плоских систем излучателей с заданной направленностью. Фазированные антенные решетки: способы электрического сканирования; фазовое сканирование.

### **3.1.9. Линейные антенны. Системы линейных антенн**

Антенны со свойствами, близкими к свойствам элементарного электрического излучателя (штыревой возбуждатель волновода, штыревая антенна, Т- и Г-образные антенны).

Антенны, близкие по своим свойствам к элементарному магнитному излучателю (петлевой возбуждатель волновода, рамочная и магнитная стержневая антенны).

Симметричный электрический вибратор в свободном пространстве. Приближенный метод определения распределений тока и заряда вдоль такого вибратора. Направленность симметричного вибратора, его сопротивление излучения и входное сопротивление. Коэффициент укорочения вибратора. Примеры практического выполнения антенн в виде симметричных электрических вибраторов.

Симметричный электрический вибратор, расположенный над идеально проводящей плоскостью и над поверхностью земли. Несимметричный (заземленный) электрический вибратор. Исследование его свойств с помощью метода зеркального изображения. Примеры антенн в виде несимметричных вибраторов.

Узкая прямолинейная щель в проводящем экране как линейный магнитный вибратор. Распределение напряжения и поля в такой щели, ее поле излучения и электрические характеристики.

Узкая прямолинейная щель в волноводе. Простые щелевые антенны.

Системы электрических вибраторов в свободном пространстве. Взаимное влияние электрических вибраторов. Системы двух электрических вибраторов. Синфазная многовибраторная система. Примеры построения многовибраторных антенн.

Многощелевые волноводные антенны. Способ возбуждения. Резонансные и нерезонансные антенны.

### **3.1.10. Антенны с плоскими излучающими раскрывами (апертурные антенны)**

Излучатель в виде конца прямоугольного волновода.

Антенны в виде электромагнитных рупоров (секториальных, пирамидальных, конических, биконических, дисконических). Оптимальные рупорные антенны. Системы рупорных антенн.

Антенны с электромагнитными линзами (линзовые антенны). Однородные замедляющие и ускоряющие электромагнитные линзы. Материалы, используемые для изготовления линз. Неоднородные линзы. Линзы для качания луча. Примеры построения линзовых антенн, их свойства и области применения.

Зеркальные антенны. Идеально проводящая поверхность как отражатель электромагнитных зеркал (плоские, параболические, сферические) и их использование для построения антенн с заданной направленностью. Антенны с плоскими металлическими зеркалами. Антенны с параболическими зеркалами (параболические антенны). Антенна со сферическими зеркалами и зеркалами специальной сферы. Двухзеркальные и многозеркальные антенны. Перископические антенные системы. Антенны с перфорированными и сетчатыми зеркалами.

### **3.1.11. Антенны в виде направителей бегущих волн (антенны бегущих волн)**

Однопроводная антенна бегущей волны. Ромбические антенны. Коротковолновая антенна бегущей волны. Директорная антенна. Спиральные антенны (цилиндрические, конические). Антенны с диэлектрическими стержневыми замедляющими направителями электромагнитных волн (диэлектрические стержневые антенны). Антенны с ребристо-стержневыми направителями бегущих волн. Антенны с плоскими прямоугольными и дисковыми направителями электромагнитных волн (импедансные антенны).

### **3.1.12. Функциональные особенности антенн**

Антенны для радиосвязи и радиовещания различных диапазонов волн. Радиолокационные антенны. Антенны со специальной формой диаграммы направленности.

Радиоастрономические антенны. Антенны радиорелейных линий. Антенны летающих объектов.

## Литература

### Основная

1. Марков, Г. Т. Антенны / Г. Т. Марков, Д. М. Сазонов. – М. : Энергия, 1975.
2. Марков, Г. Т. Антенны / Г. Т. Марков. – М. : Энергия, 1960.
3. Айзенбер, Г. З. Антенны УКВ / Г. З. Айзенбер. – М. : Связь, 1978.
4. Вольман, В. И. Техническая электродинамика / В. И. Вольман, Ю. В. Пименов. – М. : Связь, 1971.

### Дополнительная

5. Антенны и устройства СВЧ / под ред. Д. И. Воскресенского. – М. : Сов. радио, 1980.
6. Кочержевский, Г. Н. Антенно-фидерные устройства / Г. Н. Кочержевский. – М. : Связь, 1972.
7. Альтман, Дж. Устройства СВЧ / Дж. Альтман. – М. : Мир, 1968.
8. Фрадкин, А. В. Антенно-фидерные устройства / А. В. Фрадкин. – М. : Связь, 1977.
9. Фельдштейн, А. Л. Справочник по элементам волноводной техники / А. Л. Фельдштейн, Л. П. Явич, В. П. Смирнов. – М., – Л. : Госэнергоиздат, 1963.

## 3.2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

### Введение

Основная задача темы – показать историю развития антенной техники и определить круг вопросов, которые рассматриваются в теории и практике антенн и устройств СВЧ.

### *Контрольные вопросы*

1. Назначение приемной и передающей антенн.
2. Основные требования, предъявляемые к антеннам.

### 3.2.1. Основы теории цепей СВЧ

Вводятся основные понятия и параметры, определяющие свойства устройств СВЧ. Дается описание 2- и 4-полусных устройств, на входных зажимах которых определены ток и напряжение. Анализ проводится на основе положений теории цепей низких частот, знакомых студенту из курса «Основы теории цепей». Матрицы рассеяния 2- и 4-полусников, наиболее широко используемые при анализе устройств СВЧ, встречаются впервые в этом разделе.

### *Контрольные вопросы*

1. Отличие коэффициента отражения и коэффициента бегущей волны (коэффициента стоячей волны).
2. Отличие круговых диаграммы сопротивлений от круговой диаграммы проводимостей.
3. Способ определения эквивалентной схемы СВЧ-устройства.
4. Физический смысл элементов матрицы рассеяния.
5. Цель изучения различных матриц четырехполусника?
6. Условия взаимности, симметрии и реактивности в элементах матриц.
7. Условия применения метода зеркальных изображений.
8. Отличие согласованного четырехполусника от согласующего.
9. Определение функции рабочего затухания четырехполусника.

### 3.2.2. Элементы и узлы линий передачи

В фидерном тракте в общем случае содержится ряд неоднородностей в виде устройств возбуждения и отбора энергии, модуляции, детектирования, фильтрации электромагнитного сигнала и т. д. Особенности работы этих устройств и методы определения их параметров являются содержанием данного раздела. Особое внимание при изучении данного раздела следует обратить на физические принципы работы устройств, позволяющие проводить расчет их основных параметров по эквивалентным схемам с сосредоточенными параметрами.

### ***Контрольные вопросы***

1. Конструкции и свойства коаксиальных линий. Их сравнительные характеристики и области применения.
2. Элементы, применяемые для настройки коаксиальных линий.
3. Устройство и принцип работы коаксиального вращающегося сочленения.
4. Способы сочленения волноводов и коаксиальных линий.
5. Способы сочленения прямоугольных и круглых волноводов.
6. Устройство четвертьволновой вставки, реактивных штырей и диафрагм, используемых для настройки волноводов.
7. Устройство Т-образных волноводных ответвителей, дроссельных фланцевых соединений и короткозамыкающих поршней прямоугольного волновода.
8. Атенюаторы поглощающие и предельные, согласованные нагрузки.
9. Устройство детекторных и термисторных головок.
10. Линия передачи конечной длины. Основы узкополосного согласования.
11. Способы микроминиатюризации элементов фидерного тракта.

#### **3.2.3. Согласование линий передачи**

Основная задача согласования – построение и расчет согласующего четырехполюсника. Элементы узкополосного согласующего четырехполюсника могут быть рассчитаны точно или приближенно по круговой диаграмме. Для практических целей точность, получающаяся при использовании круговой диаграммы, достаточна. Поэтому усвоение методов расчета согласующего устройства с применением круговой диаграммы здесь является основным. При изучении широкополосного согласования необходимо обратить внимание на отличие постановки задачи широкополосного согласования от соответствующей задачи узкополосного согласования.

### ***Контрольные вопросы***

1. Цель согласования линии передачи с нагрузкой.
2. Суть принципа узкополосного согласования посредством одного реактивного шлейфа.
3. Изменение методики согласования одним реактивным шлейфом в случае, если волновое сопротивление шлейфа не равно волновому сопротивлению линии.
4. Суть принципа согласования двухшлейфовым трансформатором.
5. Основное свойство четвертьволнового отрезка линии передачи.
6. Способ постановки задачи широкополосного согласования линии передачи с комплексной нагрузкой.
7. Ограничения в теории широкополосного согласования линии передачи с нагрузкой.
8. Отличие требований к согласующему четырехполюснику в случаях узкополосного и широкополосного согласований.

### 3.2.4. Частотные фильтры СВЧ

Необходимо усвоить классификацию фильтров СВЧ по типу частотной характеристики, а также иметь понятие о расчете резонансной частоты, коэффициента передачи и нагруженной добротности. Знать, каким образом реализуются многозвенные фильтры СВЧ с четвертьволновыми и непосредственными связями, а также режекторные фильтры.

#### *Контрольные вопросы*

1. Методика расчета и построения ступенчатых переходов с максимально плоской и чебышевской частотными характеристиками.
2. Полосовой и режекторный фильтры и их эквивалентные схемы. Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики.
3. Фильтры гармоник: резонансные, апериодические, с поглощением энергии гармоник.

### 3.2.5. Делители мощности и балансные устройства СВЧ

В этом разделе изучаются трех- и четырехплечные узлы без потерь (волноводные, коаксиальные, микрополосковые), которые служат для ответвления энергии СВЧ, регулировки мощности проходящей волны, сложения и разделения сигналов, измерений и коммутации в трактах СВЧ. Основой для анализа этих устройств является матрица рассеяния, конкретная форма которой определяется геометрией узла и особенностями электромагнитных процессов, которые в нем протекают. Следует обратить внимание на использование матрицы рассеяния узлов при решении разнообразных задач, а также на функциональные особенности этого или иного СВЧ-узла, обуславливающие возможности его использования на практике.

#### *Контрольные вопросы*

1. Свойства  $E$ - и  $H$ -тройников с согласованными плечами. Распределение мощности между плечами во всех вариантах включения генератора.
2. Направленные ответвители: основные свойства, параметры и области применения.
3. Основные свойства двойного тройника моста. Способы согласования плеч, применение.
4. Квадратный и кольцевой мосты: основные свойства, распределение мощности между плечами во всех вариантах включения генератора.
5. Щелевой мост: основные свойства, способы согласования, применение.
6. Делители мощности и балансные устройства СВЧ в микрополосковом исполнении.

### **3.2.6. Устройства СВЧ с намагниченными ферритами**

В разделе рассматриваются волноводные устройства с ферритами, обладающими невзаимными свойствами.

В волноводных трактах радиорелейных линий, приемников СВЧ используются вентили, пропускающие волну в одном направлении, тем самым улучшающие согласование волновода с оконечными устройствами. Следует освоить принципы, положенные в основу работы резонансных вентилях и вентилях на смещении поля, а также невзаимных и взаимных фазовращателей. Наибольшее распространение из невзаимных устройств получают циркуляторы – трех- или четырехплечные невзаимные узлы, пропускающие волну между соседними плечами в определенном направлении. На использовании циркуляторов основано построение большого числа функциональных схем: вентилях; согласованных полосовых и режекторных фильтров, переключателей, фильтров разделительных и других устройств.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Вентили с поперечным ферромагнитным резонансом: принцип работы, устройство, параметры.
2. Вентили, базирующиеся на эффекте смещения поля: принцип работы, устройство, параметры.
3. Невзаимные и взаимные фазовращатели: принцип работы, устройство, параметры.
4. Циркуляторы. Примеры использования в функциональных устройствах СВЧ.
5. Циркулятор, основанный на эффекте Фарадея.
6. Фазовые циркуляторы: принцип работы, устройство, параметры.
7. Y-циркуляторы: принцип работы, устройство, параметры.
8. Возможности применения ферритов в микрополосковых устройствах.

### **3.2.7. Электродинамические основы теории антенн**

Изучении этого раздела необходимо начать с темы «Элементарные излучатели» и повторить основные теоремы электродинамики: теорема взаимности, принцип двойственности, теорема эквивалентности, средний баланс энергии и эквивалентная схема антенны.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Способ определения связи между источниками и возбуждаемыми ими электромагнитными полями.
2. Определение элементарного излучателя.
3. Виды элементарных излучателей.
4. Разъяснение теоремы взаимности.
5. Случаи использования перестановочной двойственности уравнений Максвелла.

6. Случаи использования теоремы эквивалентности.
7. Определение излучаемой мощности передающей антенны.
8. Определение диаграммы направленности, коэффициента направленного действия, коэффициента усиления передающей антенны.
9. Способ оценить приближенно максимального коэффициента направленного действия антенны по ее диаграмме направленности.
10. Определение поляризационной характеристики антенны.

### **3.2.8. Направленность систем излучателей и задача синтеза антенны**

В данном разделе подробно рассматриваются типичные для антенной техники распределения источников с точки зрения направленности действия. Показаны основные принципы построения антенн по заданным параметрам. При изучении данного раздела студент должен четко представлять возможности построения антенн с диаграммой направленности различной формы, с управляемой диаграммой направленности.

Следует обратить внимание, что в данном разделе речь идет, главным образом, о распределении источников, а не об антенне как некотором конструктивном устройстве. Техническая реализация распределения источников может быть самой разнообразной.

Изучение материала строится по принципу «от простого к сложному»: от одиночных элементарных излучателей, изученных в предыдущем разделе, переходят к изучению системы этих излучателей – сначала дискретной системы, затем непрерывной. Рассматриваются системы с равномерными амплитудными и фазовыми распределениями, а затем с неравномерными.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Суть общего метода определения поля излучения произвольной системы излучателей.
2. Определение «множитель системы излучателей».
3. Характеристика направленности действия произвольной дискретной (непрерывной) системы излучателей.
4. Характеристика поля излучения линейной периодической системы идентичных излучателей с равномерным амплитудным распределением и распределением фаз по закону бегущей волны.
5. Факторы, влияющие на направленность действия простейшей (двухэлементной) системы излучателей.
6. Способ определения направленности действия плоской дискретной периодической системы идентичных излучателей.
7. Влияние амплитудного и фазового распределения на направленность действия плоской непрерывной системы излучателей?
8. Определение идеальной плоской (поверхностной) антенны.
9. Суть метода зеркальных изображений.
10. Влияние Земли на характеристику излучения антенной системы.

11. Виды принципов построения, применяемых для создания сверхширокополосных (частотно-независимых) антенн.
12. Существующие общие методы решения задачи построения антенны с заданными свойствами.
13. Особенности синфазной периодической системы с чебышевским амплитудным распределением.
14. Электрические способы перемещения в пространстве главного максимума излучения антенной системы.
15. Определение сверхнаправленных антенных систем. Существующие возможности их построения.

### **3.2.9. Линейные антенны. Системы линейных антенн**

Материал этого раздела полностью опирается на знание элементарных излучателей. Наиболее трудным здесь является вопрос, посвященный щелевым антеннам. При изучении этого материала надо понять идею выводов выражений для сопротивления (проводимости) щели и попрактиковаться в использовании этих формул. При вычислении взаимного сопротивления полуволновых вибраторов необходимо знать лишь основу вывода, без подробных промежуточных выкладок.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Виды антенн по направленности приближающиеся к идеальным элементарным излучателям.
2. Диапазоны волн где большей частью применяются такие антенны.
3. Распределение тока и заряда вдоль симметричного электрического вибратора.
4. Основные параметры симметричного вибратора и диапазоны волн его применения?
5. Отличие несимметричного вибратора от симметричного.
6. Распределение поперечного поля в узкой прямолинейной щели, прорезанной в идеально проводящем экране.
7. Возбуждение щелей, прорезанных в стенках прямоугольного волновода.
8. Учет взаимного влияния линейных электрических вибраторов.
9. Поле излучения и электрические характеристики системы двух параллельных полуволновых вибраторов.
10. Поле излучения турникетной антенны.
11. Устройство, принцип действия и свойства резонансных волноводно-щелевых антенн.
12. Характеристики излучения, которыми обладают волноводно-щелевые антенны бегущей волны.

### **3.2.10. Антенны с плоскими излучающими раскрывами (апертурные антенны)**

Важно хорошо понять раздел, посвященный излучению открытого конца волновода. Только после этого целесообразно переходить к изучению рупорных, линзовых и зеркальных антенн. Необходимо обратить внимание на выбор оптимальных размеров при расчете этих антенн. Основные закономерности в распределении поля в раскрыве апертурных антенн и диаграммы направленности экспериментально изучаются в процессе выполнения лабораторных работ. Сравнение теоретических и экспериментальных результатов должно помочь студенту лучше понять материал данного раздела.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Способ определения коэффициента направленного действия для антенны, излучающей поверхностью, расположенной перпендикулярно направлению максимального излучения.
2. Способ определения поля излучения и коэффициента направленного действия открытого конца прямоугольного волновода.
3. Типы рупорных антенн и структура поля в их раскрывах.
4. Расчет оптимальных размеров рупорных антенн.
5. Расчет поверхности линзовых антенн?
6. Какие типы линзовых антенн наиболее распространены.
7. Методы уменьшения отражений электромагнитной волны от линзы.
8. Способы строительства антенн с однородными фокусирующими линзами.
9. Объяснение работы линзы Лüneберга.
10. Расчет характеристики излучения линзовой антенны.
11. Устройство параболической антенны. Ее свойства.
12. Методы расчета характеристики излучения параболической антенны.

### **3.2.11. Антенны в виде направителей бегущих волн (антенны бегущих волн)**

В данном разделе изучается целый класс антенных устройств, объединенных одним общим признаком – наличием бегущей волны поля. Принцип действия таких антенн, несмотря на их различное конструктивное выполнение, одинаков. Поэтому при изучении данного раздела необходимо обратить внимание на единство подхода при изучении, например, спиральных и диэлектрических антенн, проводной антенны бегущей волны и ромбической и т. д.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Особенность линейной системы излучателей в случае, когда фаза излучателей меняется по закону бегущей волны с замедленной фазовой скоростью.
2. Принцип работы однопроводной антенны бегущей волны.
3. Свойства ромбической антенны.

4. Параметры и характеристики направленности директорной антенны.
5. Свойства многоэлементных антенн бегущих волн.
6. Способы возбуждения поверхностных волн?
7. Особенности антенн, возбуждаемых поверхностной волной.
8. Сфера применения антенны с диэлектрическими и ребристо-стержневыми направляющими.

### **3.2.12. Функциональные особенности антенн**

Основные типы антенн, встречающиеся в этом разделе, уже изучены, и здесь студенту необходимо обратить внимание на вопросы практического использования различных конструкций.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Антенны, используемые для радиосвязи и радиовещания в диапазоне длинных, средних и коротких волн.
2. Особенности радиолокационных антенн.
3. Способы реализации антенн с косекансной формой диаграммы направленности и место их использования.
4. Особенности радиоастрономических антенн, антенн радиорелейных линий связи, антенн летательных аппаратов.

### 3.3. КУРСОВАЯ РАБОТА

Тема курсовой работы выбирается в соответствии с последней цифрой  $n$  студенческого билета. Если последняя цифра 0, выполняется тема 10. Числовые данные величин приведены в таблице вариантов и определяются предпоследней цифрой  $m$  студенческого билета.

**Тема 1.** Рассчитать синфазную антенную решетку печатных излучателей прямоугольной формы.

**Исходные данные.** Длина рабочей волны  $\lambda$ . Тип возбуждения печатного резонатора: несимметричная микрополосковая линия – если  $m$  четная; зонд коаксиального кабеля – если  $m$  нечетная. Тип подложки см. в табл. 1.

В расчете необходимо:

1. Определить конструктивные размеры антенны и питающей линии передач.
2. Рассчитать диаграммы направленности антенны в плоскостях  $E$  и  $H$ .
3. По диаграммам направленности определить ширину главного лепестка по уровню половинной мощности в обеих плоскостях.

Графический материал:

1. Конструктивный чертеж антенны с фидером.
2. Графики диаграмм направленности антенны.

Таблица 1

$m$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\lambda$ , мм	10	15	20	25	30	10	15	20	25	30
Подложка	ФЛАН-3,8			ФАФ-4Д			ФФ-4			

**Тема 2.** Определить геометрические размеры и направленные свойства антенны в виде параболоида вращения, облучаемого полуволновым вибратором с плоским контррефлектором.

**Исходные данные.** Длина рабочей волны  $\lambda$  (табл. 2). Коэффициент направленного действия  $D = 350$ . Угол раскрытия параболоида принять  $\varphi = 32^\circ$ .

В расчете необходимо:

1. Рассчитать диаграммы направленности облучателя в плоскостях  $E$  и  $H$ .
2. Определить размеры параболического отражателя и фокусное расстояние антенны.
3. Произвести оценку ширины главного лепестка диаграммы направленности антенны по уровню половинной мощности в плоскостях  $E$  и  $H$ .

Графический материал:

1. Конструктивный чертеж облучателя антенны.
2. Графики диаграмм направленности облучателя.
3. Конструктивный чертеж антенны.

Таблица 2

$m$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\lambda$ , мм	10	15	20	25	30	10	15	20	25	30

**Тема 3.** Рассчитать диэлектрическую антенну в виде конического стержня оптимальных размеров, излучающую поле с вертикальной поляризацией.

**Исходные данные.** Длина рабочей волны  $\lambda$ . Рабочий диапазон волн  $2Дл = 0,1л$ . Коэффициент направленного действия не менее  $D = 15$  дБ. Диэлектрическая проницаемость стержня  $\epsilon$  тангенс угла потерь  $\text{tg } \delta$  (табл. 3).

В расчете необходимо:

1. Рассчитать геометрические параметры стержня.
2. Определить фазовую скорость в стержне и затухание, вызванное тепловыми потерями в стержне.
3. Рассчитать диаграммы направленности антенны в плоскостях  $E$  и  $H$ .

Графический материал:

1. Конструктивный чертеж антенны.
2. Графики диаграмм направленности антенны в  $E$ - и  $H$ -плоскостях.

Таблица 3

$m$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\lambda$ , мм	10	15	20	25	30	10	15	20	25	30
$\epsilon$	2	2,5	3	2	2,5	3	2	2,5	3	2
$\text{tg } \delta \times 10^{-4}$	15	20	5	3	15	20	5	3	15	20

**Тема 4.** Рассчитать цилиндрическую спиральную антенну, работающую в режиме бегущих волн в диапазоне длин волн.

**Исходные данные.** Диапазон длин волн  $\lambda_{\min} - \lambda_{\max}$  (табл. 4).

В расчете необходимо:

1. Определить длину и число витков спирали, шаг намотки.
2. Коэффициент направленного действия и входное сопротивление антенны.
3. Построить диаграмму направленности антенны и определить ее параметры.

Графический материал:

1. Конструктивный чертеж антенны.
2. График диаграммы направленности.

Таблица 4

$m$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\lambda_{\min}$ , мм	60	50	100	30	60	50	100	30	60	50
$\lambda_{\max}$ , мм	100	100	150	40	120	100	200	60	100	100

**Тема 5.** Рассчитать антенну поверхностных волн с замедляющей структурой в виде прямоугольных канавок.

**Исходные данные.** Средняя длина волны рабочего диапазона  $\lambda$ . Возбуждение замедляющей структуры рупором, раскрыв которого имеет ширину  $a$ . Коэффициент направленного действия не менее  $D$  (табл. 5).

В расчете необходимо:

1. Выбрать конструктивные размеры антенны и питающего волновода.
2. Рассчитать профиль замедляющей структуры.
3. Рассчитать диаграммы направленности в плоскостях  $E$  и  $H$ .
4. Определить по диаграммам направленности ширину главного лепестка на уровне половинной мощности в обеих плоскостях.

Графический материал:

1. Конструктивный чертеж антенны.
2. График диаграммы направленности антенны.

Таблица 5

$m$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\lambda$ , мм	30	40	20	10	8	30	40	20	10	8
$a$ , мм	30	40	30	12	10	30	40	20	14	16
$D$ , дБ	30	35	30	35	40	30	35	30	40	35

**Тема 6.** Рассчитать синфазную волноводную щелевую антенну с вертикальной поляризацией.

**Исходные данные.** Длина рабочей волны  $\lambda$ . Ширина главного лепестка диаграммы направленности антенны в плоскости  $H$  по уровню половинной мощности равна  $2\theta_{0,5}$ . Максимальная мощность излучения не менее  $P_{\text{изл}}$  (табл. 6).

В расчете необходимо:

1. Выбрать конструкцию и определить размеры антенны.
2. Рассчитать диаграмму направленности антенны в плоскости  $H$ .
3. Определить коэффициент направленного действия антенны.

Графический материал:

1. Конструктивный эскиз антенны.
2. График диаграммы направленности.

Указание: при расчете антенны необходимо ориентироваться на волновод стандартного сечения.

Таблица 6

$m$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\lambda$ , мм	30	40	20	10	8	30	40	20	10	8
$2\theta_{0,5}$	20	18	16	12	10	8	10	12	14	16
$P_{\text{изл}}$ , кВт	50	30	50	100	75	50	100	30	50	75

**Тема 7.** Рассчитать многощелевую печатную антенну с последовательным возбуждением.

**Исходные данные.** Средняя рабочая частота  $f$ . Коэффициент направленного действия антенны не менее  $D$ . Антенна рассчитывается для диэлектрической подложки, марка которой указана в таблице, толщиной  $h = 2$  мм.

В расчете необходимо:

1. Определить размеры антенны.
2. Рассчитать диаграмму направленности антенны.
3. Рассчитать схему питания антенны.

Графический материал:

1. Конструктивный чертеж антенны.
2. График диаграммы направленности антенны.

Таблица 7

$m$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$f$ , ГГц	1,2	2,4	3,6	0,8	4	6	1,2	2,4	3,6	4,2
$D$ , дБ	15	20	10	15	15	20	10	15	20	20
Подложка	ФЛАН-3,8			ФАФ-4Д			ФФ-4			

**Тема 8.** Рассчитать директорную антенну.

**Исходные данные.** Средняя рабочая частота  $f$ . Диапазон рабочих частот  $2\Delta f = 0,1f$ . Коэффициент направленного действия антенны на средней частоте  $D = 9$  дБ (табл. 8).

В расчете необходимо:

1. Определить размеры антенны
2. Рассчитать диаграмму направленности антенны на средней частоте.
3. Выбрать схему питания антенны.
4. Определить коэффициент направленного действия антенны на крайних частотах ее рабочего диапазона.

Графический материал:

1. Конструктивный эскиз антенны.
2. График диаграммы направленности антенны.

Таблица 8

$m$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$f$ , МГц	300	200	470	640	1200	300	200	560	640	470

**Тема 9.** Рассчитать сканирующую антенную решетку из горизонтальных симметричных вибраторов.

**Исходные данные.** Средняя частота рабочего диапазона  $f$ . Ширина главного лепестка не более  $2\theta_{0,5}$ . Максимальный уровень боковых лепестков не более  $F_{\text{бм}}$ . Сектор сканирования в горизонтальной плоскости  $\pm 45^\circ$  (табл. 9).

В расчете необходимо:

1. Определить размеры антенной решетки.

2. Рассчитать диаграмму направленности антенны в режиме нормального излучения и на краю сектора сканирования.
3. Определить коэффициент направленного действия антенны и параметры ДН в диапазоне углов сканирования.

Графический материал:

1. Конструктивный эскиз антенной решетки.
2. График диаграммы направленности антенны.

Таблица 9

$m$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$f$ , ГГц	4	6	6	12	4	6	12	4	6	9
$F_{\text{бм}}$ , дБ,	-14	-16	-18	-20	-22	-24	-26	-28	-30	-25
$2\theta_{0,5}$ , град.	4	6	4	6	4	6	4	6	4	5

**Тема 10.** Рассчитать рупорно-линзовую антенну с коническим рупором и металлопластинчатой линзой.

**Исходные данные.** Длина рабочей волны  $\lambda$ . Коэффициент направленного действия антенны  $D = 25$  дБ. Поляризация электрического поля излученной волны – вертикальная. Диапазон длин волн частот  $2\Delta = 0,2\lambda$  (табл. 10).

В расчете необходимо:

1. Выбрать конструктивные размеры антенны и питающего волновода.
2. Рассчитать профиль линзы.
3. Рассчитать диаграммы направленности в плоскостях  $E$  и  $H$ .
4. Определить по диаграммам направленности ширину главного лепестка на уровне половинной мощности в обеих плоскостях.

Графический материал:

1. Конструктивный чертеж антенны.
2. График диаграммы направленности антенны.

Указание: при расчете антенны необходимо ориентироваться на волновод стандартного сечения.

Таблица 10

$m$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\lambda$ , см	0,8	3	5	12	6	1	10	3	7,5	10

## **4. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ТЕОРИИ**

### **4.1. Содержание программы**

#### **4.1.1. Место дисциплины в освоении специальности**

Особенности излучений по диапазонам длин волн. Необходимость экранирования радиоэлектронных средств (РЭС). Техника СВЧ: практические приложения, теория, существующие решения.

#### **4.1.2. Электромагнитные поля и его характеристики**

Электромагнитное поле (ЭМП): описание, виды, характеристики. Физическое содержание уравнений Максвелла.

Классификация сред.

Граничные условия для тангенциальных и нормальных составляющих векторов ЭМП. ГУ на поверхности идеального проводника.

Энергия ЭМП. Теорема Умова – Пойнтинга.

Волновые уравнения. Уравнения Гельмгольца для векторов поля.

Электродинамические потенциалы.

#### **4.1.3. Излучение электромагнитных волн (ЭМВ)**

Решение уравнения Гельмгольца. Условие излучения на бесконечности. Поле элементарного вибратора в ближней и дальней зоне. Сферические волны.

Диаграмма направленности.

Принцип перестановочной двойственности уравнений Максвелла.

Поляризация ЭМВ.

#### **4.1.4. Падение ЭМВ на границу раздела сред**

Плоская волна в непроводящей среде. Фазовая скорость волны, волновое сопротивление среды. Плоская волна в среде с потерями. Коэффициент фазы и коэффициент затухания. Глубина проникновения. Дисперсия, групповая скорость.

Падение волны на плоскую границу раздела сред. Законы Снелля. Коэффициенты Френеля.

Полное отражение. Поверхностные волны. Угол полного преломления. Понятие о двойном преломлении при падении электромагнитных волн на границу с анизотропной средой.

Плоские волны в анизотропных средах (ионизированный газ (плазма), ферриты в постоянном магнитном поле). Продольное и поперечное распространение волн. Эффект вращения плоскости поляризации.

#### **4.1.5. Дифракция и рефракция электромагнитных волн**

Задача дифракции как граничная задача электродинамики. Приближенные методы решения задач дифракции в квазистатической и квазиоптической областях.

Физическая оптика. Дифракция на отверстиях в экране в приближении Кирхгофа. Зоны Френеля.

Геометрическая оптика. Рефракция электромагнитных волн в неоднородной среде. Понятие о геометрической теории дифракции

#### **4.1.6. Линии передачи, элементы и устройства СВЧ**

Классификация и основные параметры линий передачи.

Прямоугольный волновод. Алгоритм построения поля волны произвольного типа. Условие одномодового режима.

Круглый волновод. Алгоритм построения поля волны произвольного типа. Условие одномодового режима.

Коаксиальная линия. Основная волна. Понятие о высших типах волн в коаксиальной линии.

Полосковые линии передачи.

#### **4.1.7. Элементы, узлы и устройства СВЧ**

Элементы коаксиальных линий передачи: соединения, элементы крепления внутреннего проводника, изгибы, короткозамыкающие поршни.

Элементы волноводных линий: соединения, изгибы, реактивные элементы, разветвления, переходники.

Узлы СВЧ-трактов: поглощающие нагрузки, аттенюаторы, фазовращатели, трансформаторы типов волн. Волноводные тройники. Двойной волноводный тройник.

Направленные ответвители. Основные параметры, конструкции волноводного и коаксиального ответвителей.

Балансные мосты. Волноводно-щелевой мост. Кольцевые балансные мосты. Ферритовые вентили и циркуляторы.

Частотные фильтры СВЧ.

#### **4.1.8. Общие сведения об антеннах**

Характеристики и параметры антенн. Типы антенн. Влияние амплитудно-фазового распределения на пространственные характеристики антенн.

Конструкции антенн СВЧ- и КВЧ-диапазонов.

#### **4.1.9. Согласование линии передачи с нагрузкой**

Цели согласования линии передачи с нагрузкой. Узкополосное согласование. Методы согласования одним реактивным шлейфом, четвертьволновым трансформатором.

Широкополосное согласование. Ограничения в теории широкополосного согласования.

#### 4.1.10. Конструирование экранов

Экранирование РЭС. Эффективность экранирования. Типы экранов. Материалы для экранов.

#### 4.1.11. Методы исследования и контроля параметров СВЧ-устройств и экранов

Измерение структуры ЭМП, коэффициента отражения, полного сопротивления.

Методика оценки эффективности экранирования.

Измерение характеристик и параметров антенн.

#### Литература

##### Основная

1. Кураев, А. А. Электродинамика и распространение радиоволн / А. А. Кураев, Т. Л. Попкова, А. К. Сеницин. – Минск : Бестпринт, 2004.

2. Вольман, В. Н. Техническая электродинамика / В. Н. Вольман, Ю. В. Пименов, А. Д. Муравцов. – М. : Радио и связь, 2002.

3. Гололобов, Д. В. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства : метод. пособие для студ. спец. 1-45 01 02 Системы радиосвязи, радиовещания и телевидения днев. и вечер. форм обуч. Ч. 1–2 / Д. В. Гололобов, В. Б. Кирильчук. – Минск : БГУИР, 2005 ; 2006.

4. Баскаков, И. С. Электродинамика и распространение радиоволн / И. С. Баскаков. – М. : Высш. шк., 1993.

5. Конструирование экранов и СВЧ-устройств / А. М. Чернушенко [и др.]. – М. : Радио и связь, 1990.

6. Шапиро, Д. Н. Основы теории электромагнитного экранирования / Д. Н. Шапиро. – Л. : Энергия, 1975.

##### Дополнительная

7. Фальковский, О. И. Техническая электродинамика / О. И. Фальковский. – М. : Связь, 1978.

8. Фельдштейн, А. Л. Справочник по элементам волноводной техники / А. Л. Фельдштейн, Л. П. Явич, В. П. Смирнов. – М., – Л. : Госэнергоиздат, 1963 ; 1967.

9. Основы проектирования микроэлектронной аппаратуры / Б. Ф. Высоцкий [и др.]. – М. : Сов. радио, 1977.

10. Гибкие конструкции экранов электромагнитного излучения / Л. М. Лыньков [и др.]. – Минск : БГУИР, 2000.

11. Юрцев, О. А. Численное моделирование процессов : метод. указания к лаб. работам по курсу «Электродинамика и распространение радиоволн» для студ. спец. «Радиотехника» / О. А. Юрцев. – Минск : БГУИР, 1999.

## 4.2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

### 4.2.1. Место дисциплины в освоении специальности

Необходимо уяснить формулу, связывающую частоту электромагнитной волны и длину волны, а также ограничения по диапазонам этих величин, установленных МСЭ. Следует понимать общую задачу, связанную с необходимостью локализации собственных излучений РЭС и внешних электромагнитных воздействий на них.

Рассмотреть особенности СВЧ-излучений сформированных источников излучения, их влияния на организм человека, возможности применения в различных сферах деятельности человека и общества.

#### *Контрольные вопросы*

1. Вид связи частоты и длины волны.
2. Определение собственного излучение РЭС.
3. Определение внешнего излучения (помехи) РЭС.
4. Виды помех.
5. Способы защиты от электромагнитных излучений.
6. Особенности воздействия СВЧ-излучений на человека.
7. Задачи разработчиков РЭС, связанные с воздействием электромагнитных полей.

### 4.2.2. Электромагнитные поля и его характеристики

Необходимо иметь представление о дескрипторах электродинамики: векторах электромагнитного поля, связи между ними, материальных уравнениях, классификации сред и др., физическом смысле уравнений Максвелла (*при этом следует помнить, что уравнения имеют строгую порядковую последовательность!*), их запись в дифференциальной, интегральной и комплексной форме.

Изучая уравнения Максвелла, надо уметь классифицировать электромагнитные явления по характеру их изменения во времени (переменные, статические, стационарные и квазистационарные поля).

Необходимо понимать, что такое граница раздела сред. Обратить внимание на то, что в общем случае граница является криволинейной, а электромагнитная волна падает на границу под произвольным углом. Поэтому следует проводить анализ нормальных и тангенциальных составляющих ЭМП.

Необходимо разобраться во всех составляющих баланса энергии в ЭМП. Знать определение вектора Умова – Пойнтинга, а также теорему Умова – Пойнтинга.

Волновые уравнения определяют характер распространения ЭМВ. Поэтому следует разобраться в аналитическом представлении этого процесса с учетом и без учета потерь.

Электродинамические потенциалы являются элементами описания волновых процессов. Следует уяснить понятие скалярного и векторного потенциа-

лов, а также их взаимосвязь, определяемую калибровкой Лоренца. И в этой связи необходимость введения электрического и магнитного потенциалов Герца.

### ***Контрольные вопросы***

1. Определение векторов  $\vec{E}$ ,  $\vec{D}$ ,  $\vec{B}$ ,  $\vec{H}$ ,  $\vec{\delta}$ .
2. Физический смысл первого и второго уравнения Максвелла.
3. Ток проводимости и ток смещения.
4. Третье и четвертое уравнения Максвелла и их физический смысл.
5. Уравнение непрерывности и закон сохранения заряда.
6. Классификация электромагнитных явлений по характеру их изменения во времени.
7. Определение границы раздела сред.
8. Привести условия для тангенциальных составляющих поля на границе раздела двух сред.
9. Привести условия для нормальных составляющих поля на границе раздела двух сред.
10. Поверхностный ток и поверхностная плотность заряда.
11. Определение вектора Умова – Пойнтинга.
12. Баланс энергий ЭМП.
13. Формулировка теоремы Умова – Пойнтинга.
14. Волновые уравнения для векторов электрического и магнитного поля.
15. Уравнения Гельмгольца.
16. Определение электрического и магнитного потенциалов.

### **4.2.3. Излучение электромагнитных волн**

При изучении этого раздела необходимо четко представлять, что первичным источником электромагнитных волн являются электрические заряды. Расчет полей излучающих систем ведется методом суперпозиции: вся система разбивается на элементарные излучатели, находится поле от каждого, а затем поля всех излучателей суммируются. Обратите внимание на принцип эквивалентности и принцип Гюйгенса – Кирхгофа, которые позволяют проследить за распространением фронта волны, начиная с момента, в который фронт волны является известным.

Положение вектора электрического поля в пространстве относительно выбранной системы координат определяет вид поляризации. Следует четко разграничить виды поляризации и методы их формирования.

### ***Контрольные вопросы***

1. Суть процесса излучения электромагнитных волн.
2. Элементарный электрический излучатель.
3. Анализ структуры поля элементарного электрического излучателя.

4. Диаграммы направленности элементарного электрического излучателя (в полярной и прямоугольной системах координат).
5. Мощность излучателя, сопротивление излучения элементарного электрического излучателя.
6. Ближняя и дальняя зоны.
7. Элементарный магнитный излучатель; поле в дальней зоне.
8. Перестановочная двойственность уравнений Максвелла.
9. Определение поляризации ЭМВ.
10. Виды поляризаций ЭМВ и принципы их формирования.

#### 4.2.4. Падение ЭМВ на границу раздела сред

Необходимо помнить, что векторы электрического и магнитного поля перпендикулярны друг другу и изменяются во времени и пространстве по гармоническим законам. В идеальной диэлектрике волны не затухают. В реальной же среде распространение волны всегда связано с затуханием. Обратите внимание на то, что параметры волны в среде без потерь не зависят от частоты, а в среде с конечной проводимостью обладают дисперсией. Это определяет параметры распространения.

При изучении вопросов, связанных с падением волны на границу раздела сред с различными параметрами следует уяснить законы Снелля и вводимые при этом коэффициенты отражения и прохождения (коэффициенты Френеля).

Среды, свойства которых зависят от направления, называют анизотропными; в таких средах векторы  $\vec{P}$  и  $\vec{E}$ ,  $\vec{D}$  и  $\vec{E}$ , а также  $\vec{M}$  и  $\vec{H}$ ,  $\vec{B}$  и  $\vec{H}$  могут быть непараллельными и, по крайней мере, один из этих параметров описывается тензором.

В ферромагнитных средах тензором описывается магнитная проницаемость. В постоянном магнитном поле один из видов магнетиков – феррит – становится анизотропной средой по отношению к переменному полю. В данном разделе следует обратить внимание на физическую природу анизотропии. Знать уравнения Максвелла для анизотропных сред.

#### *Контрольные вопросы*

1. Определение однородной плоской волны: выражение для векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ .
2. Формулы для определения фазовой скорости, длины волны, волнового числа, комплексного вектора Умова – Пойнтинга и волнового сопротивления в среде с потерями и без потерь.
3. Коэффициент фазы и коэффициент затухания; фазовая скорость и длина волны в среде с малыми и большими потерями.
4. Физическая природа анизотропии. Примеры анизотропных сред.
5. Анизотропные магнетики. Тензор магнитной проницаемости и смысл его составляющих.

6. Зависимость составляющих тензора магнитной проницаемости феррита от напряженности поля подмагничивания. Ферромагнитный резонанс.
7. Фазовые скорости и поляризация волн в продольно-намагниченном феррите.
8. Эффект Фарадея. Вращение плоскости поляризации. Необратимость эффекта Фарадея.
9. Фазовые скорости и поляризация волн в поперечно-намагниченном феррите.

#### **4.2.5. Дифракция и рефракция электромагнитных волн**

Рассматривается явление дифракции электромагнитных волн и методы решения задач дифракции (приближение Гюйгенса – Кирхгофа, геометрической оптики, метод краевых волн). Необходимо рассмотреть модель рефракции с применением законов Снелля, а также виды рефракций.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Явление дифракции электромагнитных волн. Приближенные решения дифракционных задач.
2. Условия применимости геометрической оптики. Изменение интенсивности поля вдоль луча в приближении геометрической оптики.
3. Условия применимости физической оптики. Приближения физической оптики.
4. Определение рефракции.
5. Виды рефракции.

#### **4.2.6. Линии передачи, элементы и устройства СВЧ**

Привести классификацию линий передачи – пять типов, охарактеризовать их, обозначить области применения. Рассмотреть основные параметры линий передачи: тип волны, коэффициент затухания, дисперсионная характеристика, допустимая мощность.

Отдельно необходимо изучить волноводы с прямоугольным и круглым сечением, коаксиальные и микрополосковые линии. Следует усвоить методы решения волновых уравнений для продольной составляющей основных волн и уметь определить поперечные составляющие, а также изобразить структуры полей в прямоугольном и круглом волноводах.

Иметь четкое представление об алгоритмах построения поля волны произвольного типа в волноводах с заданным сечением.

Необходимо знать основные типы волн в коаксиальных и микрополосковых линиях передачи, их структуру и основные параметры.

## **Контрольные вопросы**

1. Типы направляющих систем и требования, предъявляемые к ним.
2. Классификация линий передачи.
3. Волновые уравнения для направляемых волн.
4. Решение волнового уравнения для продольной составляющей в прямоугольном волноводе.
5. Структура поля и параметры волн  $E$  и  $H$  в прямоугольном волноводе.
6. Структура полей и основные параметры волн типа  $E$  и  $H$  в круглом волноводе.
7. Алгоритм построения поля волны произвольного типа в прямоугольном волноводе.
8. Алгоритм построения поля волны произвольного типа в круглом волноводе.
9. Токи на стенках волноводов при распространении различных типов волн.
10. Структура полей и условия их существования в коаксиальной линии.
11. Параметры микрополосковых линий.

### **4.2.7. Элементы, узлы и устройства СВЧ**

В фидерном тракте в общем случае содержится ряд неоднородностей в виде элементов возбуждения, отбора энергии или вспомогательных линий передачи, модуляции, детектирования, фильтрации электромагнитного сигнала и т. д. Особенности работы этих устройств и методы определения их параметров являются содержанием данного раздела. Особое внимание при изучении данного раздела следует обратить на физические принципы работы устройств, позволяющие проводить их расчет по эквивалентным схемам с сосредоточенными параметрами.

В этом разделе изучаются трех- и четырехплечные узлы без потерь (волноводные, коаксиальные; микрополосковые), которые служат для ответвления энергии СВЧ, регулировки мощности проходящей волны, сложения и разделения сигналов, измерений и коммутаций в трактах СВЧ. Основой для анализа этих устройств является матрица рассеяния, конкретная форма которой определяется геометрией узла и особенностями электромагнитных процессов, которые в нем протекают. Следует обратить внимание на использование матрицы рассеяния узлов при решении разнообразных задач, а также на функциональные особенности этого или иного СВЧ-узла, обуславливающие возможности его использования на практике.

В волноводных трактах приемников СВЧ используются вентили, пропускающие волну практически только в одном направлении и тем самым улучшающие согласование волновода с оконечными устройствами. Следует освоить принципы, положенные в основу работы резонансных вентилях и вентилях на смещении поля, а также невзаимных и взаимных фазовращателей. В последние годы наибольшее распространение из невзаимных устройств получают циркуляторы – трех- или четырехплечные невзаимные узлы, пропускающие волну

между соседними плечами лишь в определенном направлении. На использовании циркуляторов основано построение большого числа функциональных схем: вентилях, согласованных полосовых и режекторных фильтров, переключателей фильтров разделительных и ряда других устройств.

### **Контрольные вопросы**

1. Способы сочленения волноводов и коаксиальных линий.
2. Способы сочленения прямоугольных и круглых волноводов.
3. Устройство четвертьволновой вставки, реактивных штырей и диафрагм, используемых для настройки волноводов.
4. Устройство  $T$ -образных волноводных ответвителей, дроссельных фланцевых соединений и короткозамыкающих поршней прямоугольного волновода.
5. Атенюаторы поглощающие и предельные; согласованные нагрузки.
6. Свойства  $E$ - и  $H$ -тройников с согласованными плечами. Распределение мощности между плечами во всех вариантах включения генератора.
7. Направленные ответвители: основные свойства, параметры и области применения.
8. Основные свойства двойного  $T$ -образного моста, способы согласования плеч, применение.
9. Квадратный и кольцевой мосты: основные свойства, распределение мощности между плечами во всех вариантах включения генератора.
10. Щелевой мост: основные свойства, способы согласования, применение.
11. Делители мощности и балансные устройства СВЧ в микрополосковом исполнении.
12. Вентили с поперечным ферромагнитным резонансом: принцип работы, устройство, параметры.
13. Вентили, базирующиеся на эффекте смещения поля: принцип работы, устройство, параметры.
14. Невзаимные и взаимные фазовращатели: принцип работы, устройство, параметры.
15. Циркуляторы. Примеры использования в функциональных устройствах СВЧ.

#### **4.2.8. Общие сведения об антеннах**

Следует сконцентрировать внимание на изучении характеристик и параметров антенн – диаграммы направленности, поляризационной и частотной характеристик, входного сопротивления, коэффициентов направленного действия, усиления, полезного действия и др. Провести четкую связь при решении внутренней и внешней задачи антенны и установить взаимосвязь решения этих задач в соответствии с принципом суперпозиции в теории антенн.

Рассмотреть основные принципы построения антенн СВЧ- и КВЧ-диапазонов: рупорные, зеркальные, линзовые, антенные решетки.

## ***Контрольные вопросы***

1. Определение антенны.
2. Формы представления диаграмм направленности антенн.
3. Определение поляризационной характеристики (диаграммы) антенны.
4. Входное сопротивление антенны. Факторы влияния на параметр.
5. Определение частотной характеристики.
6. Внешняя и внутренняя задачи теории антенн.
7. Принцип суперпозиции в теории антенн. Элементарные источники излучения.
8. Рупорные антенны: основы построения, особенности, характеристики и параметры.
9. Зеркальные антенны: основы построения, особенности, характеристики и параметры.
10. Антенные решетки: основы построения, особенности, характеристики и параметры.

### **4.2.9. Согласование линий передачи**

Основная цель согласования заключается в передаче мощности от источника к ее потребителю с минимальными потерями.

В частотной области такая оптимизация может производиться в узкой или широкой полосе частот.

В общем случае процесс согласования, как правило, сводится к расчету промежуточного структурного звена, обеспечивающего приемлемую стыковку параметров двух или более соединений.

Элементы, обеспечивающие узкополосное согласование, могут быть рассчитаны точно или приближенно по круговой диаграмме Вольперта – Смитта.

При изучении широкополосного согласования необходимо обратить внимание на отличие постановки задачи широкополосного согласования от соответствующей задачи узкополосного согласования.

## ***Контрольные вопросы***

1. Причина согласования линии передачи с нагрузкой.
2. Суть принципа узкополосного согласования посредством одного реактивного шлейфа.
3. Изменение методики согласования одним реактивным шлейфом в случае, если волновое сопротивление шлейфа не равно волновому сопротивлению линии.
4. Суть принципа согласования двухшлейфовым трансформатором.
5. Основное свойство четвертьволнового отрезка линии передачи.
6. Постановка задачи широкополосного согласования линии передачи с комплексной нагрузкой.
7. Виды ограничений в теории широкополосного согласования линии передачи с нагрузкой.

8. Отличие требований к согласующему четырехполюснику в случаях узкополосного и широкополосного согласований.

#### **4.2.10. Конструирование экранов**

Четко уяснить определение и назначение электромагнитного экрана, понятие эффективности и коэффициента экранирования. Рассмотреть виды материалов для экранов электромагнитного излучения.

Рассмотреть особенности конструирования электромагнитных экранов в условиях действия излучений, связанных с отражениями от плоской проводящей поверхности, двухслойной конструкции, перманентного экрана и пр.

Изучить влияние отверстий произвольной формы на эффективность экранов.

#### ***Контрольные вопросы***

1. Определение электромагнитного экрана.
2. Материалы, используемые для создания электромагнитных экранов.
3. Определение эффективности экранирования.
4. Определение коэффициента экранирования.
5. Коэффициент отражения от проводящей поверхности.
6. Эффективность двухслойного экрана.
7. Зависимость параметров двухслойного экрана от геометрического взаиморасположения.
8. Эффективность многослойного экрана.
9. Современные методы экранирования электромагнитного излучения.

#### **4.2.11. Методы исследования и контроля параметров СВЧ-устройств и экранов**

В настоящем разделе необходимо освоить основы методов изменения структуры поля в волноведущих структурах и радиоканалах. Освоить методику измерения комплексного коэффициента отражения и КСВ с помощью измерительной линии, методику оценки эффективности экранирования заданного типа экрана.

Следует обратить внимание на особенности измерений пространственных характеристик антенн, связанных с необходимостью обеспечения расстояния дальней зоны исследования поля, влиянием отражающих (мешающих) предметов (объектов) и источников излучения.

### *Контрольные вопросы*

1. Методика измерения КСВ, КБВ, модуля коэффициента отражения.
2. Методика определения параметров экранирования.
3. Методика измерения пространственных характеристик антенн.
4. Основные требования при измерении антенн.
5. Особенности измерений диаграммы направленности по диапазонам частот.

Библиотека БГУИР

### 4.3. КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

#### Инструкция по выполнению контрольной работы

Контрольные задания составлены в 100 вариантах. Вариант задания определяется двумя последними цифрами номера студенческого билета:

$m$  – предпоследняя,  $n$  – последняя.

При выполнении контрольных работ необходимо придерживаться следующих требований:

1. Укажите прежде, чем выполнять расчет по заданию, его цель, дайте ссылку на источник, откуда заимствованы расчетные соотношения: номер литературного источника из использованного списка, страницу и номер формулы.
2. Поясните вводимые обозначения.
3. После трансляции расчетной формулы подставьте в нее числовые значения заданного варианта, приведите результаты промежуточных вычислений и итоговые цифры. В промежуточных вычислениях размерности величин не указываются; а в итоговом результате расчета обязательно приводится размерность полученной величины.
4. Выразите все величины в стандартных единицах Международной системы СИ.
5. Выполните все расчеты с точностью до третьей значащей цифры.
6. Определите векторные величины, сопровождая их рисунком с указанием направления векторов.
7. Представляйте графический материал в стандартизированной координатной сетке с размерами ячейки, определяемыми студентом. Размерный размах осей определяется так, чтобы наблюдалась динамика изменений исследуемой величины. Оси графиков должны быть обозначены соответствующими величинами с обязательным указанием их размерности. Допускается представление зависимостей при вариациях третьего (и более) параметра на одном графике при условии ранжирования линий по цвету или их виду.
8. Указывайте при выполнении контрольной работы номер студенческого билета и номер варианта.
9. Приведите в конце работы список использованной литературы.
10. Поставьте после списка литературы подпись исполнителя задания и дату сдачи контрольной работы.

## КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

**Задача 1.** На поверхность экрана с проводимостью  $\sigma$ , диэлектрической  $\varepsilon$  и магнитной  $\mu$  проницаемостью перпендикулярно падает плоская электромагнитная волна (ЭМВ) с заданной напряженностью электрического поля  $E$  и частотой  $f$  (табл. 1). Необходимо рассчитать параметры следующих конструкций экранов:

- 1) для проводящего экрана:
  - а) коэффициент отражения от поверхности;
  - б) глубину проникновения поля в металл;
  - в) постоянную распространения ЭМВ;
  - г) эффективность экрана;
- 2) для однородного экрана толщиной  $d$  (табл. 2):
  - а) характеристическое сопротивление слоя;
  - б) эффективность отражения по мощности;
  - в) эффективность ослабления по мощности;
- 3) для двухстенного экрана с толщинами стенок  $d_1$ ,  $d_2$  и расстоянием между ними  $d_{12}$  (табл. 2):
  - а) коэффициенты отражения от стенок;
  - б) эффективности стенок;
  - в) общую эффективность экрана;
- 4) провести сравнение эффективностей экранов 1, 2, 3 и выбрать оптимальный.

Таблица 1

$m$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\sigma$ , См/м	2,0	4,0	5,0	6,0	10	15	10	6,0	8,0	4,0
$\varepsilon$	80	75	70	65	60	50	40	30	20	20
$\mu$	100	200	300	400	500	100	200	300	400	500
$E_m$ , В/м	50	60	70	80	90	100	105	110	115	120
$f$ , МГц	100	200	300	400	500	600	700	800	900	200

Таблица 2

$n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$d$ , мкм	50	60	70	80	90	100	105	110	115	120
$d_1$ , мкм	20	25	40	10	15	25	10	6	8	4
$d_2$ , мкм	20	40	10	15	25	10	10	8	4	10
$d_{12}$ , мкм	200	250	400	10	150	25	100	60	80	40

**Задача 2.** Электромагнитная волна с частотой  $f$  (табл. 3) создает напряженность электрического поля  $E = 10$  мВ/м в месте расположения отверстия в виде щели с размерами  $x_0 \times y_0$  или круга с радиусом  $r$  на экране толщиной  $d$  (табл. 2).

Необходимо:

- 1) рассчитать эффективность экранирования экрана:
  - а) с одним отверстием;
  - б) с заданным числом  $N$  отверстий и структурой матрицы  $M$  (табл. 4);
  - в) для ограниченного числа отверстий  $N_0$  в экране предложить способы повышения эффективности;
- 2) предложить альтернативный способ экранирования и его техническую реализацию на основе современных разработок;
- 3) определить выигрыш нового экрана по сравнению с заданным в п. 1

Таблица 3

$m$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$f$ , ГГц	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$x_0$ , м	0,02		0,004		0,006		0,008		0,005	
$y_0$ , м	0,01		0,001		0,003		0,004		0,003	
$r$ , м		0,02		0,04		0,002		0,08		0,001

Таблица 4

$n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$N$	10	20	30	40	30	20	30	10	40	80
$M^*$	К	Ш	К	Ш	К	Ш	К	Ш	К	Ш
$N_0$	3	6	8	5	7	6	3	4	12	4

\*Расположение отверстий: К – квадратное; Ш – шахматное

**Задача 3.** В волноводе с поперечными размерами  $a \times b$  или радиусом  $R$  (табл. 5) требуется:

1. Определить критическую и выбрать рабочую длину волны в волноводе.
2. Изобразить распределение электрических и магнитных силовых линий вдоль соответствующих сторон волновода заданного в табл. 6 типа волны. Нарисовать эскиз, иллюстрирующий распределение токов проводимости и токов смещения.
3. Изобразить на рисунке с распределением токов проводимости продольные и поперечные излучающие щели.
4. Рассчитать передаваемую мощность, если амплитуда электрической составляющей поля в пучности равна 1 В/м, а также предельно допустимую мощность ( $E_{\text{проб}} = 3 \cdot 10^6$  В/м).
5. Определить типы волн, которые могут при выбранной длине волны распространяться в данном волноводе.

Таблица 5

$m$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$a$ , м	0,02		0,04		0,06		0,08		0,05	
$b$ , м	0,01		0,01		0,03		0,04		0,05	
$R$ , м		0,02		0,04		0,06		0,03		0,08

Таблица 6

$n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип волны	$H_{10}$	$E_{11}$	$H_{20}$	$E_{12}$	$H_{21}$	$H_{21}$	$H_{11}$	$E_{22}$	$H_{12}$	$H_{11}$

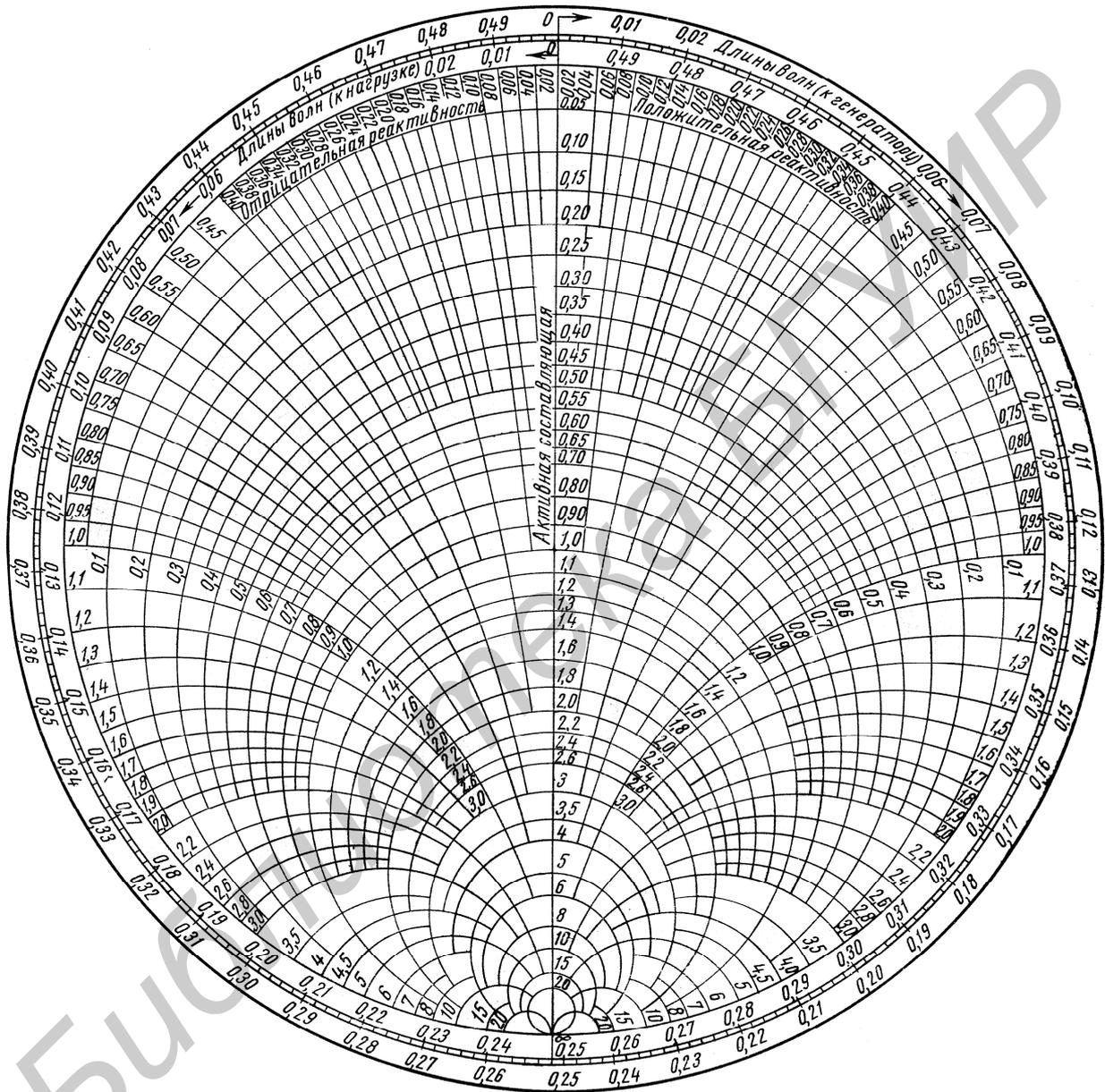
Решение задачи целесообразно начинать с расчета критической волны для заданных размеров поперечного сечения и заданного типа волны. Воспользовавшись алгоритмом построения структуры поля для волны произвольного типа, изобразить распределение силовых линий в поперечном и продольном сечениях волновода. Пользуясь правилом излучающей щели, нанести на рисунок с распределением токов продольные и поперечные излучающие щели.

Библиотека БГУИР

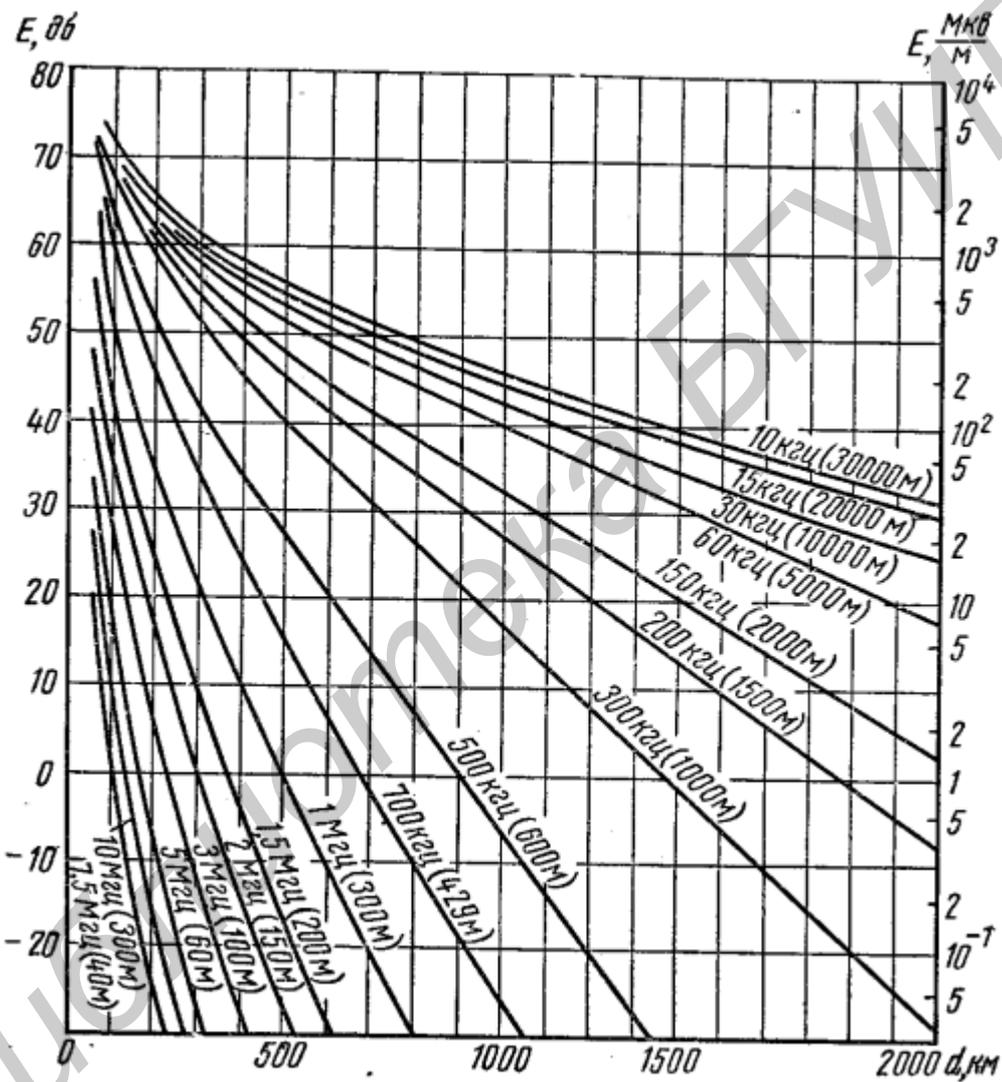
## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>3</b>
<b>1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И ВОЛНЫ .....</b>	<b>4</b>
1.1. Содержание программы .....	4
Литература .....	7
1.2. Методические рекомендации.....	8
1.3. Контрольные задания .....	16
Инструкция по выполнению контрольной работы.....	16
Контрольная работа.....	17
<b>2. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН.....</b>	<b>20</b>
2.1. Содержание программы .....	20
Литература .....	24
2.2. Методические рекомендации.....	25
2.3. Контрольные задания .....	34
Инструкция по выполнению контрольных работ.....	34
Контрольная работа 1.....	34
Контрольная работа 2.....	37
<b>3. АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ.....</b>	<b>40</b>
3.1. Содержание курса.....	40
Литература .....	44
3.2. Методические рекомендации.....	45
3.3. Курсовая работа.....	53
<b>4. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ТЕОРИИ.....</b>	<b>58</b>
4.1. Содержание программы.....	58
Литература.....	60
4.2. Методические рекомендации .....	61
4.3. Контрольные задания.....	70
Инструкция по выполнению контрольной работы .....	70
Контрольная работа .....	71
Приложение 1. Круговая диаграмма Смита.....	75
Приложение 2. Зависимость напряженности электрического поля от расстояния и частоты для сухой почвы.....	76
Приложение 3. Зависимость напряженности электрического поля от расстояния и частоты для влажной почвы .....	77

Круговая диаграмма Смита



Зависимость напряженности электрического поля от расстояния и частоты для сухой почвы





*Учебное издание*

**Гололобов Дмитрий Владимирович**  
**Бобков Юрий Юрьевич**

***ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ТЕОРИИ,  
АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ***

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Редакторы *И. П. Острикова, И. В. Ничипор*  
Корректор *Е. Н. Батурчик*  
Компьютерная верстка *Ю. Ч. Клочкевич*

Подписано в печать 20.06.2013. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 4,77. Уч.-изд. л. 4,6. Тираж 150 экз. Заказ 166.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.  
220013, Минск, П. Бровки, 6